ORIGENES DEL CANIBALISMO • AZNALCOLLAR, TRES AÑOS DESPUES

INVESTIGACION y CIENCIA

OCTUBRE 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



Autorreplicación de las máquinas

- 25 años de matemática
- Al-Biruni
- Células cibernéticas

9 770210 136004 00301

Investigación y Ciencia 25 aniversario

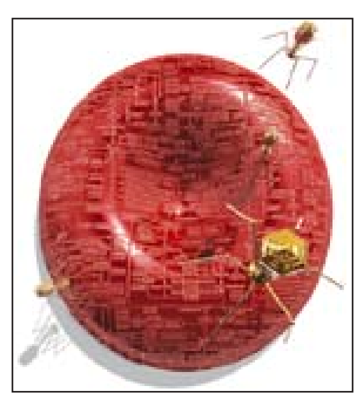
INVESTIGACION y CIENCIA

Octubre de 2001 Número 301

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES





Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Kay Chernush
6	Samuel Velasco
7	Kay Chernush
8	Samuel Velasco; cortesía del Laboratorio Nacional de Oak Ridge
10	Denis Finnin, Museo Americano de Historia Natural
14-17	David Emmite
18-19	George Retseck
20	©1999 Delphine Aures *Eurelios*
22	David Emmite
25-28	Enrique Macpherson, Miguel Ferrer y Joan Grimalt
29	Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Conservación de la Naturaleza
30	Laboratorio RSGIS, Universidad de Granada, CSIC
31-33	Enrique Macpherson, Miguel Ferrer y Joan Grimalt
34-35	Laboratorio RSGIS, Universidad de Granada, CSIC
44-45	Slim Films
47	James Aronovsky
48	Slim Films
50-51	David Brill
53-55	Tim D. White
56	Hulton-Deutsch Collection *Corbis* (*arriba*); Leonard de Selva *Corbis* (*abajo*)
58-59	Mark Leong
60	Tom Wolff
61	Mark Leong
62	Mark Leong (*fotografía*); cortesía de Michael Sheinkman (*mapa*)
63	Mark Leong
65-75	J. M. Aroca Hernández-Ros
76	Uwe Reichert
77	Mathematisch-Physikalischer Salon, Staatliche Kunstsammlungen Dresden
78-79	Biblioteca Universitaria de Edimburgo (*arriba*); Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz, Berlin (*abajo*)
80	Gotthard Strohmaier
81	Atelier Kühn/SdW
82	Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz; Benaki Museum, Athen (*inserto*)
83	Gotthard Strohmaier (*izquierda*); Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz (*derecha*)
84-86	Juan M. R. Parrondo
87	John McFaul
88-89	George Retseck

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Francisco Gracia García-Miguel: *El superordenador Beowulf*; Luis Bou: *La autorreplicación de las máquinas* y *Aventuras problemáticas*; Juan Pedro Campos: *Células cibernéticas*; Carlos Lorenzo: *Prehistoria del canibalismo*; Francesc Castelló: *Al-Biruni, el sabio que Occidente ignoró*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

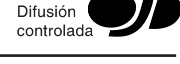
para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada 

Copyright © 2001 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2001 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

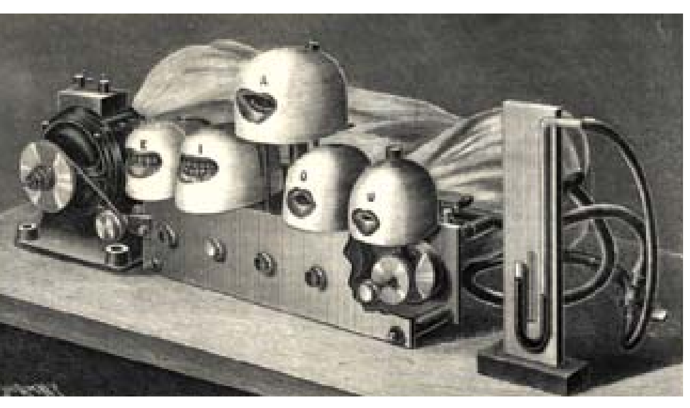
ECONOMÍA DE PRODUCCIÓN Y CONSUMO. «Este artículo trata de un nuevo esfuerzo para combinar los hechos con la teoría económica, llamado análisis 'interindustrial' o de 'producción-consumo' ('input-output'). Esencialmente es un método de análisis que se aprovecha del patrón, bastante estable, del flujo de bienes y servicios entre los elementos de nuestra economía para presentar una imagen estadística mucho más detallada. Este método retrata no sólo el estado de una economía completa, sino también su estructura fina, representando gráficamente la producción de cada industria en función de su consumo en las demás. El método ha tenido que esperar hasta las modernas computadoras de alta velocidad y también a la disposición del gobierno y entidades privadas para acumular montañas de datos.» —Wassily W. Leontief [*Nota de la redacción: Por su sistema, Leontief ganó el premio Nobel de economía de 1973.*]

...cien años

VIVIENDAS MODELOS. «Uno de los grandes problemas cuya solución se requiere de las grandes ciudades es el alojamiento de los pobres. Particularmente en Londres y Nueva York, se está ahora dispensando atención al problema, debido no sólo del espíritu general de altruismo, sino también por el reconocimiento de que los viejos métodos para alojar a los pobres contribuían directamente a la expansión de la delincuencia y las enfermedades. Al Departamento de Edificación de Nueva York se le han presentado los planos de una nueva vivienda modelo que se levantará en la avenida A y las calles 78 y 79, por la Compañía de Casas Suburbanas, una asociación de industriales y filántropos con sentido práctico. El edificio, de hermosa arquitectura, no tendrá nada que ver con los repulsivos habitáculos tan corrientes en los distritos congestionados.»

SAURIOS AMERICANOS. «La región de las Llanuras del Oeste, vastísima, es el paraíso de los paleontólogos, pues allá vivieron y murieron innúmeras generaciones de reptiles que antaño poblaron la Tierra. El profesor Edward Drinker Cope, famoso paleontólogo, ha proporcionado una descripción muy gráfica del elasmosaurio. 'En el antiguo mar, pudo haberse divisado una enorme figura reptiliforme que se alzaba sobre la superficie y permanecía erguida mostrando una garganta cónica y una cabeza aflechada. Al sumergirse por entero, percibiríamos la espuma generada por su masa poderosa. Un cuello extraordinario se proyectaba desde un cuerpo de proporciones elefantinas. Presentaba por extremidades dos pares de aletas como las de los pleisosaurios, de los que este buceador difería principalmente en la disposición de los huesos del tórax.»

DAISY, DAISY. «El doctor Marage ha construido un aparato que es un paso hacia la producción de una máquina parlante que funcione, aunque se limita a generar vocales (*véase ilustración*). En la producción del sonido desempeñan un papel importante, con la laringe, las mejillas, que contribuyen con las armonías que dan a la voz su carácter. El doctor Marage ha construido un aparato, empleando la sustancia plástica que usan los dentistas, para reproducir el interior de la boca de una persona cuando ésta pronuncia las diferentes vocales.»



La máquina parlante, 1901

...ciento cincuenta años

KAYAK. «La expedición norteamericana al Artico ha retornado con muchas curiosidades de las regiones septentrionales de la Bahía de Melville y Groenlandia. Las embarcaciones de los esquimales son unas curiosas piezas de construcción naval. Las fabrican tensando pieles de foca sobre un armazón ligero de madera. Su longitud es de algo más de tres metros y medio por unos 35 cm de ancho. Con un diestro movimiento del remo, los expertos remeros vuelcan por completo su barca, para emerger por el otro costado. Con tan frágiles embarcaciones se divierten arponeando focas con el tiempo más borrascoso.»

PRODUCCIÓN EN MASA. «Nuestros ancestros hacían los objetos para que durasen más de un invierno. Si ahora queremos artículos sólidos y duraderos hay que pagar buenas cantidades de dinero, como antaño. Las medias y los paños de esa clase se despachan con una destreza sorprendente, y se manufacturan en tiempos brevísimos, pero los trabajos de punto de nuestras abuelas, los idolatrados calcetines que tejían en los telares con sus dedos temblorosos, valen por una docena de las prendas modernas.»

El superordenador

William W. Hargrove,
Forrest M. Hoffman
y Thomas Sterling



1. AGRUPACION de ordenadores personales en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge en Tennessee. Por su carácter artesanal se le ha dado el nombre de “superordenador de piedra”.



Beowulf

Se ha encontrado un procedimiento económico para resolver problemas computacionales de extrema dificultad: la interconexión de ordenadores personales para que trabajen coordinados

En el famoso cuento de la sopa de piedras, un soldado perdido se detiene en un villorrio, donde alardea de su capacidad para hacer una sopa con sólo agua y un canto pulido. Los habitantes del pueblo, inicialmente escépticos, acaban, compasivos, trayendo pequeñas aportaciones: el corazón de un repollo, un manojo de zanahorias, un trozo de carne, etcétera. Al final, el caldero contiene sopa suficiente para saciar a todos. La moraleja a extraer es inmediata: con la cooperación se alcanzan resultados notables, aun cuando se parta de contribuciones pequeñas, a simple vista insignificantes.

Los investigadores recurren a una estrategia similar de cooperación para construir superordenadores, las potentes máquinas que realizan miles de millones de cálculos por segundo. En su mayoría hacen uso del procesamiento en paralelo; constan de numerosos microprocesadores de alta velocidad que trabajan en tándem para resolver problemas de la complejidad de la previsión del tiempo o la simulación de explosiones nucleares. Fabricados por IBM, Cray y otras empresas, cuestan decenas de miles de dólares, un precio prohibitivo para los grupos de investigación con modesto presupuesto. No les ha quedado otro remedio a las universidades y laboratorios estatales que aprender a construir sus propios superordenadores. ¿Cómo? Mediante la interconexión de ordenadores personales y la elaboración de programas que permiten que estos computadores de mesa resuelvan problemas enrevesados.

En 1996 dos de los autores (Hargrove y Hoffman) nos hallábamos en un apuro así. Trabajábamos en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL) en Tennessee. Nos proponíamos levantar un mapa nacional de ecosistemas regionales, definidos por condiciones ambientales: todas las zonas con el mismo clima, estructura geológica y características del suelo se engloban en la misma ecorregión. Para levantar un mapa de alta resolución de los estados contiguos de la Unión, dividimos el país en 7,8 millones de celdas cuadradas, cada una con una superficie de un kilómetro cuadrado. Para cada celdilla había que tomar en cuenta 25 variables, que iban desde la precipitación mensual media hasta la concentración de nitrógeno en el suelo. Una tarea imposible de realizar por un solo ordenador personal o estación de trabajo. Se requería un superordenador de procesado en paralelo, que, además, estuviera a nuestro alcance.

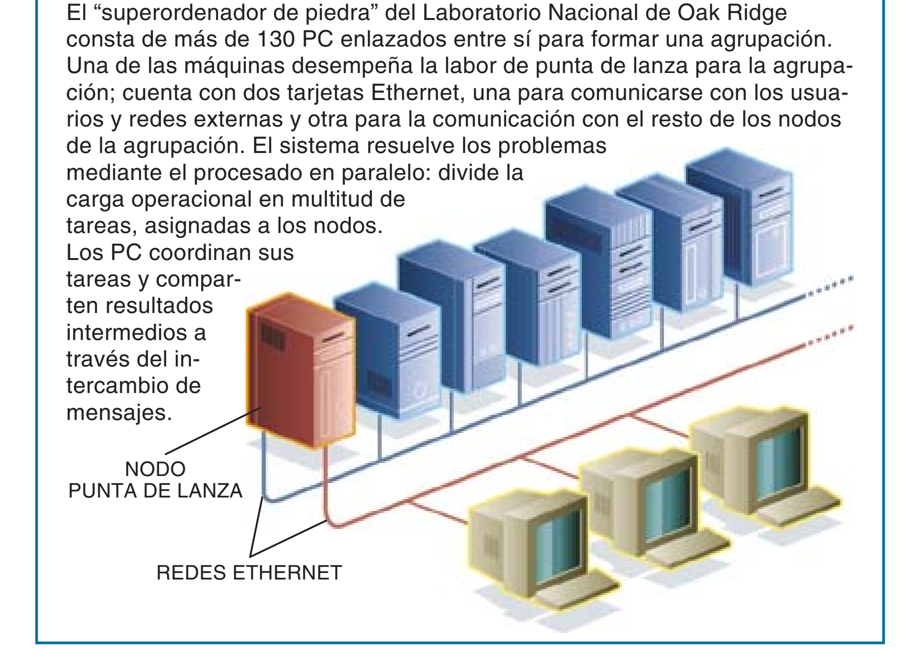
Optamos por formar una agrupación o batería de ordenadores anticuados, de los que el ORNL se hubiera desprendido en cualquier caso. Lo apodamos "superordenador de piedra", pues lo construimos sin apenas gastar un centavo. Ello no obstaba para que nuestra agrupación de ordenadores personales (en adelante PC) encerrara potencia suficiente para cartografiar las ecorregiones con una precisión sin precedentes. Otros grupos de investigadores han generado luego agrupaciones más potentes que rivalizan con el comportamiento de los mejores superordenadores a sólo una fracción del coste de éstos. Tan ventajosa relación prestaciones-precio ha llamado la atención de algunas compañías, que piensan ya servirse de agrupaciones para tareas de cierto nivel de complejidad, por ejemplo la decodificación del genoma humano. No nos cabe la menor duda de que la implantación de agrupaciones de ordenadores provocará una revolución en el campo de los ordenadores, al proporcionar un enorme poder de procesamiento a cualquier equipo de investigación, universidad o negocio que lo desee.

Beowulf y Grendel

La idea de la interconexión de ordenadores no constituía, en sí misma, ninguna novedad. En los años cincuenta y sesenta, el ejército norteamericano del aire tendió la SAGE, una red de ordenadores de válvulas de vacío para protegerse de un inesperado ataque nuclear soviético. A mediados de los ochenta, Digital Equipment Corporation acuñó el término "cluster" (agrupación) al integrar sus minicomputadoras de gama media VAX para formar un sistema mayor. Las redes de estaciones de trabajo —por lo general menos potentes que las minicomputadoras, aunque más rápidas que los PC— se convirtieron en algo común en los centros de investigación. A principios de los noventa, los científicos empezaron a plantearse la creación de agrupaciones de PC, inducidos en parte por el bajo coste

UNA AGRUPACION DE ORDENADORES

El "superordenador de piedra" del Laboratorio Nacional de Oak Ridge consta de más de 130 PC enlazados entre sí para formar una agrupación. Una de las máquinas desempeña la labor de punta de lanza para la agrupación; cuenta con dos tarjetas Ethernet, una para comunicarse con los usuarios y redes externas y otra para la comunicación con el resto de los nodos de la agrupación. El sistema resuelve los problemas mediante el procesado en paralelo: divide la carga operacional en multitud de tareas, asignadas a los nodos. Los PC coordinan sus tareas y comparten resultados intermedios a través del intercambio de mensajes.





2. **SISTEMA formado por monitor y teclado para resolver los problemas que puedan surgir en el funcionamiento correcto del superordenador de piedra.**

asociado a la producción en masa de sus microprocesadores. Pero lo que reforzó el atractivo de esa idea fue la caída del precio de Ethernet, la técnica dominante en la interconexión de ordenadores en redes de área local.

Los avances en la programación facilitaron también el advenimiento de las agrupaciones de varios PC. En los años ochenta, Unix se erigió en el sistema operativo dominante para la computación científica y técnica. Por desgracia, los sistemas operativos instalados en los PC carecían de la potencia y de la flexibilidad de Unix. Pero en 1991 un universitario finlandés, Linus Torvalds, creó el Linux, un sistema operativo similar a Unix y que funcionaba en los PC. Torvalds permitió que su sistema operativo fuera accesible de manera gratuita en Internet; en muy poco tiempo, cientos de programadores comenzaron a aportar mejoras. El sistema operativo Linux, que goza hoy de gran difusión entre los ordenadores independientes, resulta muy adecuado para agrupaciones de PC.

La primera agrupación de PC nació en 1994 en el Centro Goddard de Vuelos Espaciales. La NASA, a la que pertenece dicha entidad, andaba buscando una solución para los complicados problemas computacionales asociados a las ciencias de la Tierra y del espacio. Necesitaba una máquina capaz de alcanzar un gigaflop, es decir, realizar mil millones de operaciones de coma flotante por segundo. (Una operación de coma flotante es equivalente a un cálculo simple como la suma o la multiplicación.) En aquel entonces, un superordenador comercial capaz de alcanzar esta velocidad venía a costar un millón de dólares, y dedicarlo a un solo grupo de investigadores resultaba derrochador.

El tercero de los autores (Sterling) decidió adentrarse en el sistema de agrupaciones de PC, un planteamiento reputado radical en aquel entonces. Con Donald J. Becker, compañero suyo en el Goddard, Sterling conectó 16 PC, cada uno de los cuales contenía un microprocesador Intel 486; emplearon el sistema Linux y una red Ethernet estándar. Para aplicaciones científicas, esta agrupación de PC alcanzaba los 70 megaflop, o sea, 70 millones de operaciones de coma flotante por segundo. Aunque nos parezca poco de acuerdo con los estándares actuales, esa velocidad no era mucho menor que la de algunos superordenadores comerciales de aquel momento. La agrupación se construyó, además, con 40.000 dólares, la décima parte del precio de una máquina comercial con características similares en 1994.

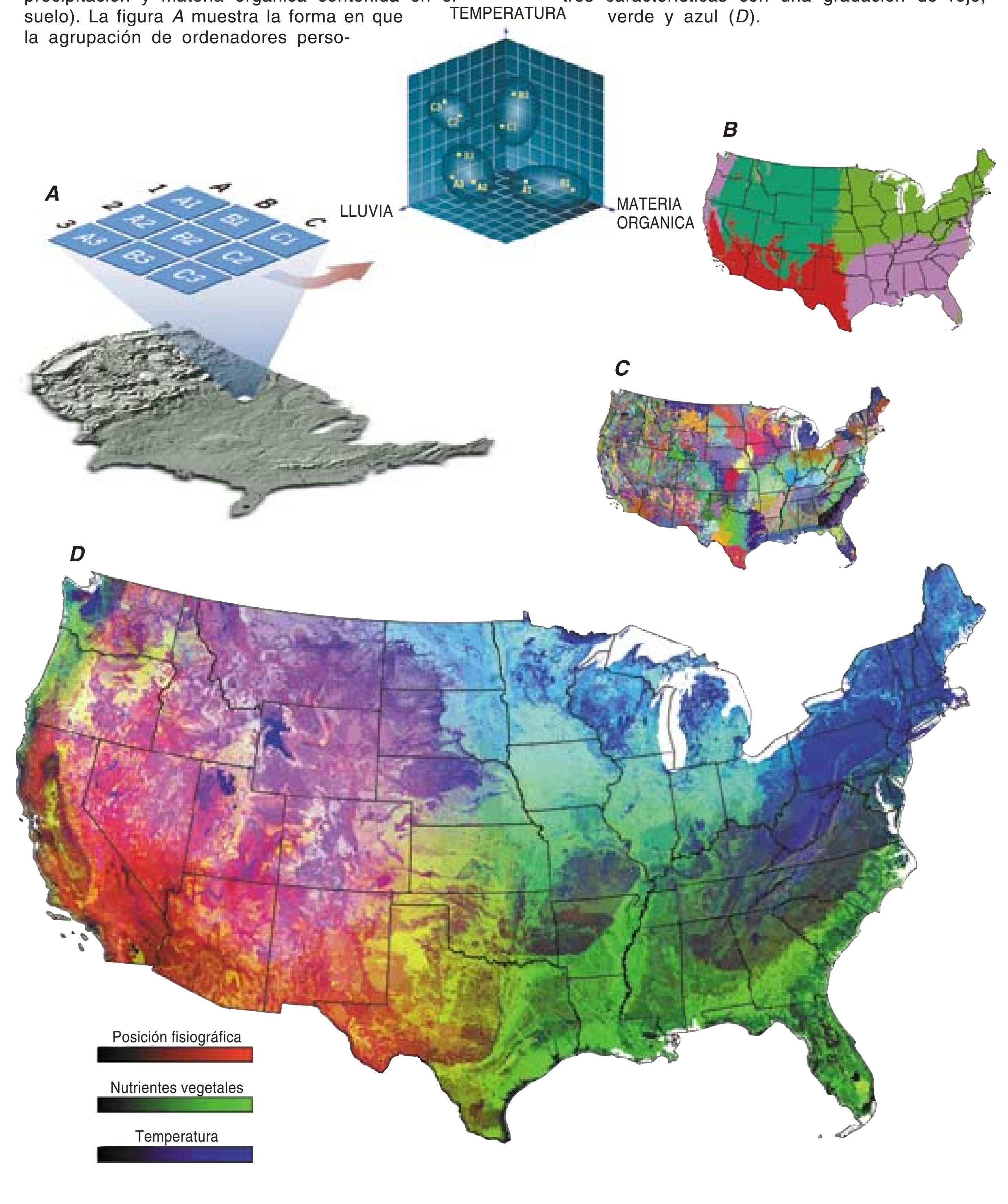
Los investigadores de la NASA lo denominaron "Beowulf", en re-

Los autores

WILLIAM W. HARGROVE, FORREST M. HOFFMAN y THOMAS STERLING han participado en el desarrollo del sistema Beowulf. Hargrove trabaja en el departamento de física e ingeniería de la computación del Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL) en Tennessee, en cuyo departamento de ciencias ambientales Hoffman, especialista en ordenadores, presta sus servicios. Sterling creó la primera agrupación Beowulf mientras investigaba en el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA. Hoy se halla adscrito al Instituto de Tecnología de California.

CARTOGRAFIA CON EL SUPERORDENADOR DE PIEDRA

Para levantar el mapa de las ecorregiones de los estados contiguos de la Unión, nuestro superordenador de piedra comparó 25 variables ambientales de 7,8 millones celdas de un kilómetro cuadrado. A modo de ejemplo, considérese la clasificación de nueve celdas basada en sólo tres variables (temperatura, precipitación y materia orgánica contenida en el suelo). La figura *A* muestra la forma en que la agrupación de ordenadores personales representaría las celdas en un espacio de datos tridimensional y las agruparía en cuatro ecorregiones. El mapa de cuatro regiones divide la nación en zonas reconocibles (*figura B*); el mapa que divide el país en 1000 ecorregiones proporciona más detalle (*C*). Otra aproximación es la representación de las tres características con una gradación de rojo, verde y azul (*D*).



ferencia al joven héroe de la leyenda altomedieval que derrotó al gigante Grendel arrancándole uno de sus brazos. Con ese nombre se designa ahora toda agrupación económica e integrada por PC comerciales. En 1996 aparecieron dos descendientes de la primera agrupación Beowulf: Hyglac (construido por investigadores del Instituto de Tecnología de California y del Laboratorio de Propulsión a Chorro) y Loki (montado en el Laboratorio Nacional de Los Alamos). Cada agrupación constaba de 16 microprocesadores Intel Pentium Pro. Con un coste inferior a 50.000 dólares, alcanzaron un rendimiento sostenido de más de un gigaflop; cubrióse así el objetivo de la NASA.

El sistema Beowulf se nos ofrecía como la solución perfecta para el problema que nos ocupaba, el mapa ecológico regional de los EE.UU. Con una sola estación de trabajo apenas podríamos manejar los datos de unos pocos estados; además, no cabía el recurso de asignar diferentes regiones a estaciones de trabajo distintas, toda vez que debían compararse y procesarse simultáneamente los datos ambientales de cada sección del país. En otras palabras, necesitábamos un sistema de procesamiento en paralelo. En 1996 formalizamos una solicitud de 64 nuevos PC con microprocesadores Intel Pentium II para construir un superordenador Beowulf. Pero al tribunal evaluador de nuestra propuesta en el ORNL le pareció implausible y la rechazó.

No nos rendimos. Presentamos un proyecto alternativo. Sabíamos que los PC arrinconados que el Departamento de Energía tenía en Oak Ridge se sustituían con modelos modernos. En una página web interna se anunciaban los PC antiguos y se subastaban como material sobrante. Tras un rápido escarceo descubrimos la existencia de centenares de ordenadores anticuados, esperando la salida mencionada. Quizá podríamos construir así nuestra agrupación Beowulf con máquinas que, concedidas sin coste alguno, reciclaríamos. Habilitamos una sala del ORNL donde antaño había instalado un ordenador, y nos dedicamos a recoger los PC sobrantes para montar nuestro "superordenador de piedra".

La tienda de la ganga digital

La computación en paralelo se guía por el principio del "divide y vencerás". Un sistema de procesado en paralelo secciona un problema complejo en múltiples tareas de componentes menores. Estas tareas se asignan a los diferentes nodos del sistema —por ejemplo, los PC que componen una agrupación Beowulf—, que realizan su cometido de manera simultánea. De la naturaleza del problema dependerá el rendimiento del procesamiento en paralelo. Un factor a tener en cuenta es con qué frecuencia deben los nodos comunicarse entre sí para coordinar su trabajo y compartir resultados parciales. Hay problemas que requieren dividirse en un número ingente de tareas minúsculas; puesto que tales problemas desmenuzados necesitan un intercambio frecuente de información, no son adecuados para procesado paralelo. Pero los problemas menos sutiles sí pueden repartirse en porciones mayores. Además, al no demandar tanta interconexión entre nodos, admiten presta solución con sistemas de procesamiento en paralelo.

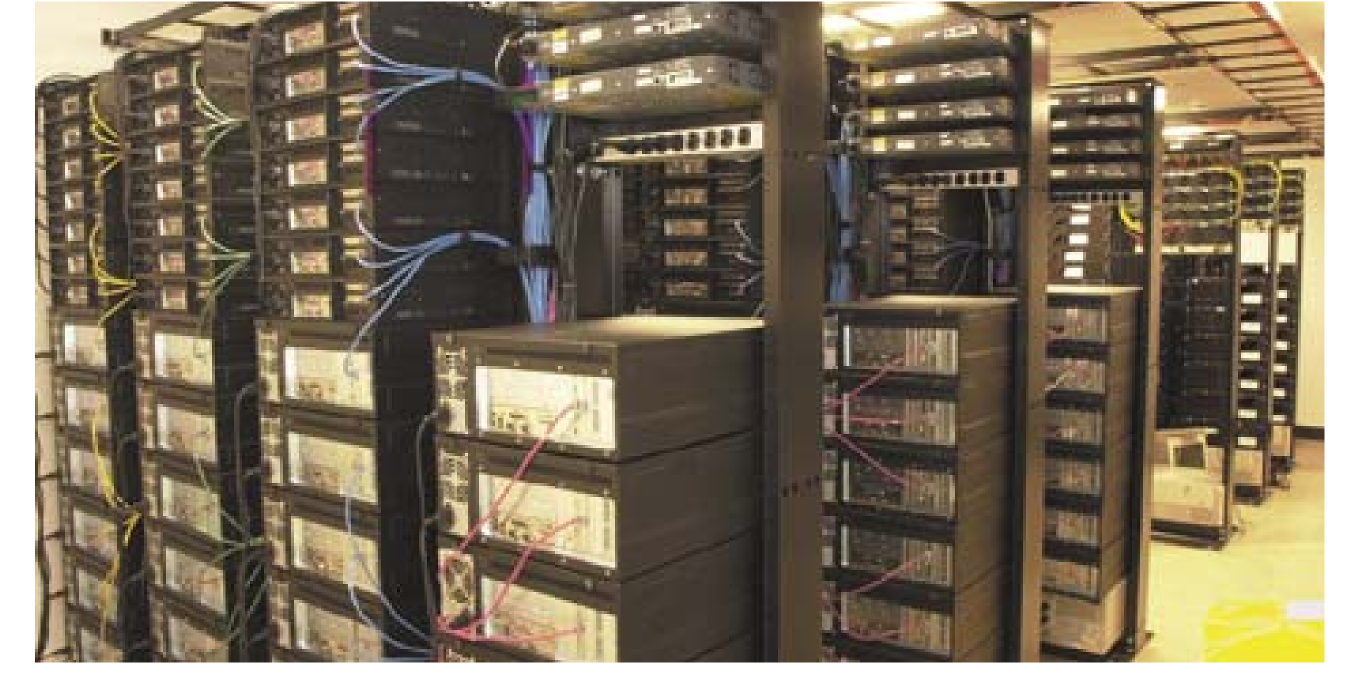
A la hora de formar una agrupación Beowulf se han de decidir varios aspectos de diseño del sistema. Para conectar los PC podemos emplear redes Ethernet estándar u optar por soluciones especializadas, Myrinet por ejemplo. Por motivos presupuestarios escogimos la solución Ethernet, que es gratuita. Seleccionamos un PC que valiera de punto de acceso del agrupamiento; instalamos en él dos tarjetas Ethernet, una para la comunicación con usuarios externos y la otra para la comunicación con el resto de los nodos, que quedarían conectados en su propia red privada. A través del intercambio de mensajes entre los distintos PC se coordinan las tareas. Las dos bibliotecas más utilizadas para el intercambio de paquetes son la interfaz de mensajería (MPI, de "message-passing interface") y la máquina virtual paralela (PVM, de "parallel virtual machine"), ambas disponibles de manera gratuita en Internet. En nuestro superordenador de piedra operan ambos sistemas.

Muchas agrupaciones Beowulf son homogéneas: todos los PC tienen los mismos componentes y microprocesadores. Esta uniformidad simplifica la gestión y el manejo de la agrupación, pero no se trata de un requisito imprescindible. Nuestro superordenador de piedra contaría con una mezcolanza de tipos y velocidades de procesador, pues queríamos aprovechar cualquier equipo que se nos concediera. Empezamos con modelos PC que contenían procesadores Intel 486, aunque luego sólo se incorporaron equipos basados en Pentium con al menos 32 megabytes de RAM y 200 megabytes de capacidad de almacenamiento en disco duro.

De entrada, no abundaban los ejemplares que estuvieran a la altura de nuestros objetivos. Hubo que combinar los mejores componentes de diferentes PC y convertir a éstos en nodos de nuestro sistema. Cada vez que abríamos una máquina sentíamos la curiosidad del que desenvuelve un regalo de cumpleaños. ¿Tendría un buen disco duro, gran cantidad de memoria o una placa madre ampliada (el mejor de los casos), y se nos había donado por equivocación? En numerosas ocasiones sólo encontrábamos un trasto exhausto con el ventilador cubierto de polvo.

Una vez desatornillado el espécimen, anotábamos sus componentes en una etiqueta para facilitar luego la extracción de las piezas de interés. Establecimos una selección de marcas, modelos y cubiertas preferidas y nos convertimos en expertos descerrajeros de las claves configuradas por sus antiguos dueños. En promedio había que desventrar cinco PC para construir un buen nodo.

A medida que cada nuevo nodo se incorporaba a la agrupación, le cargábamos el sistema operativo Linux. Dimos pronto con la forma de montar el ordenador sin necesidad de incorporarle monitor y teclado. Construimos un ingenio capaz de determinar el problema de un nodo deficiente. Nuestro superordenador de piedra ejecutó su pri-



3. AGRUPACION DE ORDENADORES del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York. Contiene 560 microprocesadores Pentium III. Los investigadores hacen uso del sistema para el estudio de la formación de estrellas y su evolución.

mer código en 1997. En mayo de 2001 constaba ya de 133 nodos: 75 PC con microprocesadores Intel, 53 máquinas más rápidas, basadas en Intel-Pentium, y cinco estaciones de trabajo Alpha de Compaq, más céleres aún que las anteriores.

No entraña especial dificultad el ir actualizando nuestro superordenador. Se empieza por reemplazar los nodos más lentos. Dentro de las tareas de gestión de la agrupación, cada nodo se somete a una prueba sencilla de velocidad cada hora. La jerarquización de los nodos en razón de su velocidad nos ayuda a tener un control estricto de la agrupación. A diferencia de las máquinas comerciales, el funcionamiento del superordenador de piedra siempre va a mejor, gracias a la aportación incesante de actualizaciones gratuitas.

Resolución de problemas en paralelo

La programación en paralelo requiere habilidad e ingenio. Puede constituir un reto mayor que la propia conjunción de ordenadores para crear el sistema Beowulf. Por modelo de programación acostumbra recurrirse a aplicaciones del tipo cliente-servidor. En él, un nodo, que actúa como cliente, dirige el procesado desarrollado por otro o varios más nodos servidores. Nosotros ejecutamos el mismo software en todos los nodos que integran el superordenador de piedra; asignamos secciones diferentes de código a los nodos cliente y servidor. Cada microprocesador de la agrupación ejecuta sólo la sección apropiada para su tarea. Los errores de programación pueden tener consecuencias importantes y provocar un descarrilamiento general en cadena cuando del fallo de un nodo se sigue el de los demás. La búsqueda del error entre los restos del desastre puede resultar muy complicada.

Otro aspecto espinoso es el de la distribución del trabajo para su procesamiento en paralelo por los PC del sistema. Dado que el superordenador de piedra alberga microprocesadores dispares, con velocidades muy distintas, no podemos repartir de una forma homogénea la carga de trabajo entre los nodos: si actuáramos así, las máquinas más rápidas estarían ociosas durante largos períodos de tiempo a la espera de que las más lentas acabaran su procesamiento. Por eso desarrollamos un programa en cuya virtud el nodo cliente envía más información a los nodos servidores céleres conforme van terminando su tarea. En esta organización de distribución de carga, los PC más rápidos realizan la mayor parte del trabajo, aunque las máquinas lentas contribuyen al funcionamiento del sistema.

En la resolución del problema de identificación de las ecorregiones comenzamos por abordar la organización de la ingente cantidad de información a manejar: los 25 datos ambientales de cada una de las 7,8 millones de celdas de los estados contiguos de la Unión. Generamos un espacio de datos de 25 dimensiones, donde cada dimensión representaba una variable distinta (temperatura media, índice de precipitación, característica del suelo, etcétera). Asociamos a continuación cada celda con el punto correspondiente del espacio de datos. Por definición, dos puntos próximos entre sí en el espacio de datos presentan características similares y, por tanto, se adscriben a la misma ecorregión. La proximidad geográfica no constituye ningún factor en esa clasificación; por ejemplo, si dos picos de montaña muestran entornos parecidos, sus puntos del espacio de datos se hallarán muy juntos entre sí, con independencia de que les separen físicamente miles de kilómetros.

Con la información organizada, había que especificar el número de ecorregiones que se mostrarían en el mapa. La agrupación de PC asigna, a cada ecorregión, una posición seminal dentro del espacio de datos. Para cada uno de los 7,8 millones de puntos informativos, el sistema determina la posición se-

minal más próxima y adscribe el punto en cuestión a la ecorregión pertinente. Luego, la agrupación identifica el baricentro o núcleo de cada ecorregión, es decir, la posición media de todos los puntos adscritos a la región. Ese núcleo sustituye a la posición seminal en su calidad de punto definidor de la ecorregión. La agrupación itera entonces el proceso, reasignando los puntos informativos a ecorregiones en función de su distancia de los núcleos. Al final de cada iteración se calculan nuevos núcleos para cada ecorregión. El proceso se repite hasta que se alcanza la situación en que el número de puntos informativos que cambian su adscripción ecorregional es inferior a una cifra preestablecida. En ese momento se da por terminado el proceso de clasificación.

El levantamiento de mapas constituye una tarea propicia para el procesamiento en paralelo. Por una razón potísima: los distintos nodos de la agrupación analizan de un modo independiente subconjuntos de los 7,8 millones de puntos informativos. Tras cada iteración, los nodos servidores envían el resultado de sus cálculos al nodo cliente, quien promedia los números recabados de todos los subconjuntos para determinar las nuevas posiciones nucleares de cada ecorregión. El cliente remite entonces esta información a los nodos servidores para la siguiente tanda de cálculos. El procesado paralelo permite también seleccionar, para cada ecorregión, las mejores posiciones seminales al principio del estudio. Elaboramos un algoritmo que posibilitara que los nodos de nuestro superordenador de piedra determinasen de manera colectiva los puntos informativos con mayor grado de dispersión; se tomarían luego éstos por posiciones seminales. Si la agrupación arranca con unas posiciones seminales bien dispersas, se requerirán un número menor de iteraciones para cartografiar las ecorregiones.

El trabajo empeñado cristalizó en una serie de mapas de los EE.UU. que mostraban cada ecorregión en un color diferente. Los había desde los que representaban al país dividido en cuatro ecorregiones hasta los que lo partían en 5000. En los mapas con un número menor de ecorregiones aparecían zonas fácilmente reconocibles; los estados de las Montañas Rocosas, por ejemplo, y el desértico sudoeste. Los mapas con miles de ecorregiones, por el contrario, ofrecen una complejidad mucho mayor que cualquier clasificación ambiental del país realizada con anterioridad. Puesto que bastantes especies vegetales y animales viven en una o dos ecorregiones exclusivamente, resulta palmario el interés de nuestros mapas para el estudio de la flora y la fauna en peligro.

En un comienzo, escogíamos al azar los colores de las ecorregiones. Más tarde buscábamos cierto parecido con el entorno que representaban. La combinación estocástica de nueve de las variables ambientales en tres identificadores compuestos nos permitió representarlas en el mapa con gradaciones de rojo, verde y azul. Cuando se colorea así el mapa, las tonalidades sustituyen a las líneas de contorno: el sudeste húmedo verdea, el frío noreste aparece azulado y, rojo, el oeste árido.

El superordenador de piedra logró incluso representar el desplazamiento de las ecorregiones en los EE.UU. en la hipótesis de producirse variaciones en las condiciones ambientales por culpa del calentamiento del planeta. Recurrimos a dos situaciones o cuadros climáticos que habían pergeñado otros grupos de investigación; comparamos el mapa de ecorregiones actual con los previstos para el año 2099. A tenor de tales proyecciones, a finales del siglo XXI el entorno ambiental de Pittsburgh se parecerá al observado ahora en Atlanta; la situación de Minneapolis, por su parte, se habrá acercado a la de la actual St. Louis.

El futuro de las agrupaciones

Para medir el rendimiento de un superordenador se le somete a una serie de pruebas comparativas, en particular la velocidad de ejecución de un programa estándar. Eso es lo acostumbrado. Con mayor rigor científico preferimos centrar-

nos en su idoneidad para llevar a cabo aplicaciones estándar. ¿Cómo evaluar nuestro superordenador de piedra? Con el fin de averiguarlo, ejecutamos la misma clasificación de ecorregiones con el superordenador Paragon de Intel, propiedad del ORNL, poco antes de su jubilación. En su momento fue la máquina más rápida del laboratorio, con una velocidad punta de 150 gigaflop. Sobre la base del cotejo de procesadores, el tiempo de procesado del Paragon fue más o menos el mismo que el del superordenador de piedra. Nuestra agrupación tiene una velocidad máxima de aproximadamente 1,2 gigaflop. En esta técnica incipiente, más que la velocidad y capacidad importa dar con un buen algoritmo de procesado en paralelo.

El sistema Beowulf ha experimentado, desde la construcción del superordenador de piedra, un desarrollo sorprendente. Se han creado nuevas agrupaciones con nombres exóticos —Grendel, Naegling, Megalon, Brahma, Avalon, Medusa y theHive, por sólo mencionar algunos—, que han multiplicado las prestaciones al alcanzar mayor velocidad a menor coste. En noviembre, 28 de los 500 ordenadores más rápidos del mundo eran agrupaciones de PC, estaciones de trabajo o servidores. Con sus 512 procesadores Intel Pentium III, la agrupación de LosLobos, de la Universidad de Nuevo México, es el octogésimo ordenador en velocidad; opera a 237 gigaflop. La agrupación Cplant, de los Laboratorios Nacionales Sandia, cuenta con 580 procesadores Alpha de Compaq y ocupa el octogesimocuarto lugar en el ranking. La Fundación Nacional para la Ciencia y el Departamento de Energía proyectan construir agrupaciones avanzadas que operen en el rango de los teraflop (un billón de operaciones de coma flotante al segundo), compitiendo con la velocidad de los superordenadores más rápidos del planeta.

Los sistemas Beowulf también se están abriendo camino en el ámbito empresarial. Las compañías de productos informáticos comienzan a vender agrupaciones a empresas con un alto nivel de informatización. IBM, por ejemplo, está construyendo una agrupación de 1250 servidores para NuTec Sciences, empresa de biotecnología que proyecta dedicar el sistema a la identificación de genes responsables de enfermedades. De parejo interés es la tendencia hacia el desarrollo de redes de PC que contribuyen con su potencia de procesamiento a tareas colectivas. Pensamos en SETI@home, lanzado por investigadores de la Universidad de California en Berkeley que analizan señales de radio del espacio profundo en su búsqueda de señales de vida inteligente. SETI@home envía chorros de datos vía Internet a más de tres millones de PC, que procesan los datos de radioseñales en su tiempo libre. Algunos expertos de la industria de los ordenadores predicen que los investigadores terminarán por crear un tendido computacional similar a la red energética: los usuarios podrán obtener capacidad de procesado con la misma facilidad con que ahora contratan suministro eléctrico.

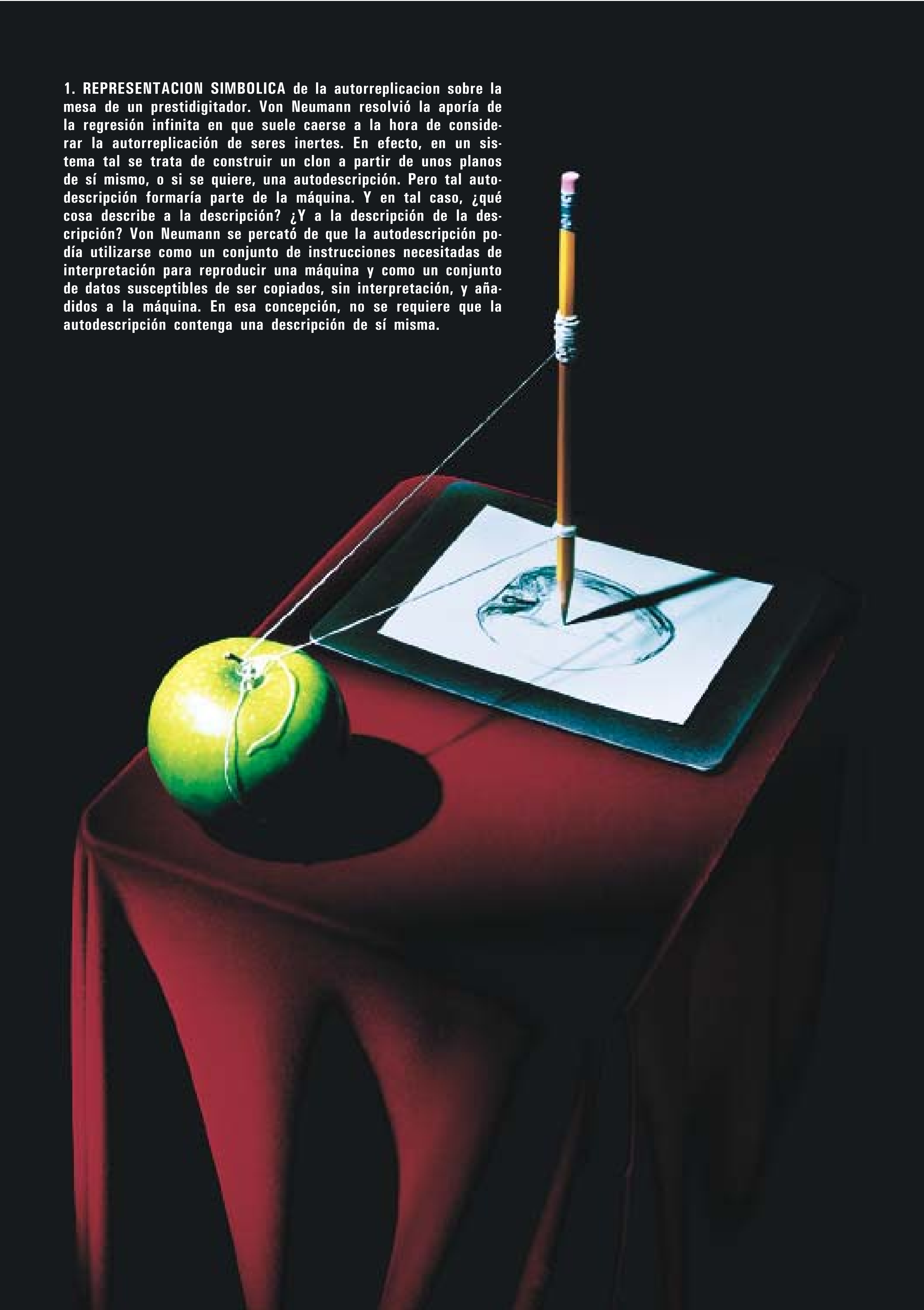
El sistema Beowulf es, por encima de todo, una fuerza multiplicadora. Acerca la computación de alto nivel, exclusiva de unos pocos privilegiados, a los sistemas de bajo coste de procesado en paralelo, accesibles para la mayoría con recursos modestos. Grupos de investigación, universidades o pequeñas empresas pueden construir sus propias agrupaciones Beowulf, su propio superordenador.

Bibliografía complementaria

CLUSTER COMPUTING: LINUX TAKEN TO THE EXTREME. F. M. Hoffman y W. W. Hargrove en *Linux Magazine*, vol. 1, n.º 1, páginas 56-59; primavera 1999.

USING MULTIVARIATE CLUSTERING TO CHARACTERIZE ECOREGION BORDERS. W. W. Hargrove y F. M. Hoffman en *Computers in Science and Engineering*, vol. 1, n.º 4, páginas 18-25; julio/agosto 1999.

HOW TO BUILD A BEOWULF: A GUIDE TO THE IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF PC CLUSTERS. Dirigido por T. Sterling, J. Salmon, D. J. Becker y D. F. Savarese. MIT Press, 1999.



1. REPRESENTACION SIMBOLICA de la autorreplicacion sobre la mesa de un prestidigitador. Von Neumann resolvió la aporía de la regresión infinita en que suele caerse a la hora de considerar la autorreplicación de seres inertes. En efecto, en un sistema tal se trata de construir un clon a partir de unos planos de sí mismo, o si se quiere, una autodescripción. Pero tal autodescripción formaría parte de la máquina. Y en tal caso, ¿qué cosa describe a la descripción? ¿Y a la descripción de la descripción? Von Neumann se percató de que la autodescripción podía utilizarse como un conjunto de instrucciones necesitadas de interpretación para reproducir una máquina y como un conjunto de datos susceptibles de ser copiados, sin interpretación, y añadidos a la máquina. En esa concepción, no se requiere que la autodescripción contenga una descripción de sí misma.

La autorreplicación de las máquinas

Engendran los pájaros, las abejas... ¿podrán hacerlo algún día las máquinas?

Moshe Sipper y James A. Reggia

Los manzanos engendran manzanos. ¿Podrá haber máquinas que engendren máquinas? En nuestros días, la construcción de una máquina, por sencilla que sea, requiere un elaborado aparato de manufactura. ¿Sería posible dotar a un dispositivo artificial de la capacidad de multiplicarse por sí solo? Desde antiguo, la autorreplicación ha sido tenida por una de las propiedades fundamentales que distinguen a lo vivo de lo inerte. A lo largo de la historia, también, la reproducción biológica ha estado envuelta en un halo de misterio, debido a nuestra limitada comprensión de su funcionamiento; un misterio que ha tornado inverosímil su factibilidad por un artefacto humano. Se dice que cuando René Descartes manifestó a Cristina de Suecia que los animales no eran sino otra forma más de autómatas mecánicos, la reina le señaló un reloj y le dijo: "Vea que esto engendre descendencia".

El problema de la autorreplicación mecánica se trasladó desde la filosofía a los dominios de la ciencia y la técnica a finales de los años cuarenta del siglo pasado, merced al trabajo del eminente matemático y físico John von Neumann. Algunos investigadores han llegado a construir replicadores materiales. Hace 40 años, por ejemplo, el genetista Lionel Penrose y su hijo Roger (hoy famoso físico) construyeron pequeños montajes en madera contrachapeada que exhibían una forma sencilla de autorreplicación. Pero la autorreplicación ha demostrado tener dificultad tal, que la mayoría de los investigadores se valen para estudiarla del instrumento conceptual que von Neumann desarrolló, a saber, los autómatas celulares bidimensionales.

Ejecutados en un ordenador, los autómatas celulares permiten la simulación de una enorme variedad de autorreplicadores en lo que vendrían a ser universos elementales, cuyas leyes físicas difieren de las nuestras. Tales modelos consienten dejar de lado problemas logísticos, como los de construcción material y los energéticos, para centrarse en las cuestiones fundamentales del flujo de información. ¿Por qué es un ser vivo capaz de reproducirse, y por qué, en cambio, han de ser construidos por humanos los objetos mecánicos? ¿De qué modo emerge la autorreplicación de un organismo a partir de numerosas interacciones en los tejidos, las células o las moléculas? ¿Cómo pudo la evolución darwinista dar origen a organismos autorreplicantes?

Las primeras respuestas que han ido surgiendo han inspirado el desarrollo de circuitos de silicio capaces de repararse por sí mismos, así como el de moléculas autocatalíticas [*véase* "Moléculas sintéticas autorreplicantes", por Julius Rebek, Jr., en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1994]. Y puede que esto sea sólo el principio. En el campo de la nanotécnica se considera que la autorreplicación será crucial para la manufactura de máquinas de tamaño molecular; en la exploración espacial, por otra parte, se contempla que una variante macroscópica del proceso podría permitir la colonización de planetas utilizando materiales *in situ*. Progresos recientes han conferido alguna credibilidad a estas ideas de resonancias futuristas. Como sucede en genética, ingeniería nuclear o en química, quienes estudiamos la autorreplicación hemos de afrontar el doble reto de crear máquinas capaces de reproducirse por sí mismas y de evitar que se cumplan predicciones distópicas en el sentido de que los artilugios escapen a nuestro control. El conocimiento que adquirimos contribuirá a discriminar las técnicas benéficas de las malignas.

Vida en juego

En la literatura de ficción científica es frecuente plantear la autorreplicación como una consecuencia natural de la técnica actual; pero al hacerlo, pasa por alto el profundo problema que entraña, a saber, cómo evitar una regresión infinita. Un sistema podría tratar de construir un clon a partir de unos

planos de sí mismo, o si se quiere, una autodescripción. Ahora, tal autodescripción formaría parte de la máquina. Y en tal caso, ¿qué cosa describe a la descripción? ¿Y a la descripción de la descripción? La autorreplicación equivaldría, pues, a pedirle a un arquitecto que preparase un plano absolutamente perfecto de su propio estudio. Ese plano habría de contener una versión a escala del propio plano, la cual contendría a su vez una versión del plano a escala todavía menor, y así una y otra vez. A falta de esta información, un constructor que pretendiera recrear el estudio no podría lograrlo por completo: tendría que dejar un espacio vacío en el lugar que ocupaba el plano.

Debemos a von Neumann la genial idea que permite romper la regresión infinita. Von Neumann se percató de que la autodescripción podía utilizarse de dos modos: primero, como un conjunto de instrucciones cuya interpretación desemboca en la construcción de una reproducción del dispositivo; segundo, como un conjunto de datos susceptibles de copiarse literalmente, sin interpretación, y anexados al niño recién creado, de manera que también éste posea la facultad de autorreplicación. Merced a tal proceso bifásico, ya no es necesario que la autodescripción contenga una descripción de sí misma. En el símil de estudio de arquitectura, el plano contendría los planos de fabricación de una máquina fotocopiadora. Una vez construidos el estudio y la fotocopiadora, la cuadrilla de construcción se limitaría a sacar una copia del plano y colocarla en el estudio.

Las células vivas se valen de su autodescripción, de su genotipo, exactamente de estas dos formas: transcripción (el ADN del genoma se copia sin apenas interpretación para formar el ARNm) y traducción (se interpreta el ARNm para sintetizar proteínas). Von Neumann concibió esta dicotomía transcripción-traducción varios años antes que los biólogos, y su trabajo resultó crucial para comprender la autorreplicación en la naturaleza.

Pensando en demostrar estas ideas, von Neumann y el matemático Stanislaw M. Ulam acertaron con la noción de autómata celular. Para la simulación de un autómata celular se utiliza una plantilla, similar a un damero, de casillas cuadradas (las células); cada una puede hallarse vacía u ocupada por uno de varios componentes potenciales. A intervalos temporales discretos, cada célula examina su estado y el de sus vecinas; decide si ha de metamorfosearse en un componente distinto. Para tomar la decisión, la célula se atiene a reglas bastante sencillas, idénticas para todas las casillas. Estas reglas constituyen la física básica del mundo del autómata celular. Todas las acciones y decisiones se efectúan localmente: las células no tienen conocimiento directo de lo que acontece más allá de su vecindad inmediata.

La aparente simplicidad de los autómatas es engañosa; no entraña ni facilidad en su diseño ni pobreza en su comportamiento. El autómata celular más conocido, un juego llamado *Vida*, creado por John Horton Conway, engendra motivos y configuraciones asombrosamente intrincados. Muchas cuestiones atinentes al comportamiento dinámico de los autómatas celulares son formalmente irresolubles. Para ver qué desarrollo va a tener una configuración determinada hemos de efectuar una simulación completa [*véase* "Lo último en partículas fórmicas", por Ian Stewart, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1994]. A su manera, un modelo de autómata celular puede ser tan complejo como el mundo real.

Máquinas copiadoras

En el seno de un autómata celular se produce una autorreplicación cuando un grupo de componentes —una "máquina"— construye, tras una serie finita de pasos, un duplicado de sí mismo no lejos del lugar que ocupaba. La máquina de von Neumann se fundaba en un constructor universal, una máquina que, dotada de las instrucciones apropiadas, podía crear cualquier configuración. El constructor constaba de multitud de tipos de componentes, que se extendían sobre decenas de millares de casillas; para especificarlo había que llenar las páginas de un libro, tal era la extensión del manuscrito. Dada su complejidad, no se ha logrado simularlo por entero, ni mucho menos materializarlo. En el juego de Vida, un constructor sería todavía más complejo, porque las funciones realizadas por las distintas células del modelo de von Neumann —transmisión de señales y generación de nuevos componentes— han de ser, en el juego de Vida, llevadas a cabo por estructuras compuestas.

Yendo al otro extremo, resulta sencillo hallar ejemplos triviales de autorreplicación. Imaginemos un autómata celular con un solo tipo de componente, denotado +, y que cada casilla se atiene a una única regla, a saber: si exactamente una de las cuatro casillas vecinas de los puntos cardinales contiene una +, la casilla se convierte en +; en cualquier otro caso quedará vacía. Con esta regla, una sola + se convierte en otras cuatro +, cada una de las cuales crece de igual manera, y así sucesivamente.

Esta exuberante proliferación no arroja mucha luz sobre los principios de la autorreplicación, porque no hay una máquina interesante. Queda abierta, claro está, la cuestión de cómo distinguir una máquina "interesante" de un autómata trivialmente prolífico. No se ha conseguido todavía una respuesta satisfactoria. Resulta palmario que la estructura replicante tiene que

Los autores

MOSHE SIPPER y JAMES A. REGGIA se vienen ocupando desde hace mucho tiempo en la autoorganización de los sistemas complejos. Sipper es lector numerario en la Universidad Ben Gurion, en Israel, e investigador invitado en el laboratorio de sistemas lógicos del Instituto Politécnico Suizo en Lausana. Se interesa por la computación evolutiva, los sistemas autorreplicantes y la computación celular. Reggia enseña informática aplicada a la neurología en el Instituto de Estudios Informáticos Avanzados de la Universidad de Maryland. Dirige investigaciones sobre modelos computacionales del cerebro y sus trastornos.

ser "compleja" en cierto sentido. Ha de contener, por ejemplo, múltiples y diversos componentes, cuyas interacciones susciten, tomadas en conjunto, la replicación. (Se trata de una versión del proverbial "el todo ha de ser mayor que la suma de sus partes".) La existencia de múltiples componentes distintos permite alojar una autodescripción en el seno de una estructura replicante.

Muchos han sido los investigadores que a lo largo de los años transcurridos desde el trabajo seminal de von Neumann han venido sondeando el dominio que media entre lo complejo y lo trivial, desarrollando replicadores que requieren menos componentes, menor espacio, o reglas más sencillas. Se dio un gran paso adelante en 1984, cuando Christopher G. Langton, a la sazón en la Universidad de Michigan, observó que ciertos dispositivos de almacenamiento "por circulación en bucle" —que habían constituido módulos de máquinas autorreplicantes anteriores— podían ser programados para que se replicaran por cuenta propia. Estos dispositivos constan normalmente de dos piezas: el propio bucle, que es un tren de componentes que circulan en torno a un rectángulo, y un brazo de construcción, que sobresale desde un vértice del rectángulo y se adentra en el espacio circundante. Los componentes en circulación constituyen una receta para el bucle; por ejemplo: "avanza tres casillas al frente, después, gira a la izquierda". Cuando esta receta llega al brazo de montaje, las reglas del autómata efectúan una copia de ella. Uno de los ejemplares continúa circulando dentro del bucle; el otro sigue brazo abajo, donde se le interpreta como instrucciones.

Langton, tras renunciar al requisito de construcción universal, esencial en la metodología de von Neumann, demostró la posibilidad de construir un replicador a partir de sólo siete componentes, que ocupaban nada más que 86 casillas. Han sido ideados por uno de los autores (Reggia) y sus colegas bucles más sencillos todavía. No son bucles triviales, pues constan de múltiples componentes que interactúan, e incluyen una autodescripción. Curiosamente, la asimetría desempeña aquí un papel inesperado: las reglas que gobiernan la replicación suelen ser más sencillas cuando los componentes no tienen simetría de rotación que cuando sí la poseen.



2. DESDE EL TRABAJO SEMINAL de von Neumann se han venido desarrollando replicadores de creciente simplificación. En 1984, Christopher G. Langton observó que ciertos dispositivos de almacenamiento "por circulación en bucle" —que habían constituido módulos de máquinas autorreplicantes anteriores— podían programarse. El artista ha colocado sobre la mesa del prestidigitador lo que a él le evoca esa expresión.

La replicación aflora

Se lograron las estructuras autoreplicantes anteriores con una buena dosis de ingenio y tenaz perseverancia en los tanteos: un procedimiento arduo y con frecuencia exasperante, pues una pequeña modificación en alguna de las reglas suele provocar un comportamiento global muy diferente, cuando no la desintegración de la estructura en cuestión. Trabajos recientes han ido más allá del método de diseño directo. En lugar de elaborar las reglas a la medida, buscando que se adapten a un determinado tipo de estructura, se ha experimentado con diversos conjuntos de reglas, se ha llenado la cuadrícula del autómata con una "sopa primigenia" de componentes tomados al azar y se ha estudiado la aparición espontánea de autorreplicadores.

En 1997, Reggia y Hui-Hsien Chou, éste hoy en la Universidad estatal de Iowa, observaron que en tanto la densidad inicial de los componentes en libre flotación superase cierto valor umbral, se podía confiar en la aparición de pe-

queños bucles autorreplicantes. Los bucles que hacían colisión se aniquilaban mutuamente, aflorando así un proceso continuo, no sólo de nacimiento, sino también de muerte. Con el tiempo, los bucles proliferaron, fueron aumentando de tamaño y evolucionaron debido a mutaciones desencadenadas por residuos de colisiones anteriores. Aunque las reglas del autómata eran deterministas, las mutaciones eran aleatorias, porque se trataba de un sistema complejo y se habían elegido al azar las ubicaciones iniciales de los componentes.

Aunque los bucles mencionados no pretenden ser simulacros de entes vivos sino máquinas abstractas, vale la pena compararlos con estructuras biomoleculares. Los bucles recuerdan vagamente al ADN circular de las bacterias; el brazo de montaje actúa como la enzima que cataliza la replicación de ADN. Y lo que reviste mayor importancia: los bucles replicantes ilustran una vía de emersión de comportamientos globales complejos a partir de interacciones locales simples. Por ejemplo, componentes que van desplazándose en torno a un bucle, aunque las reglas nada especifican sobre movimiento. Lo que realmente ocurre es que las células individuales están cobrando vida, están muriendo o se están metamorfoseando de modo tal, que una configuración se elimina de una posición para reconstruirse en otro lugar, un proceso que percibimos como movimiento. En breve, los

CONSTRUCCION DE UN REPLICADOR

LA SIMULACION de un pequeño bucle autorreplicante con piezas de ajedrez permite hacerse una idea intuitiva del funcionamiento de estos sistemas. El modelo de autómata celular aquí ilustrado posee cuatro tipos de componentes: peones, caballos, alfiles y torres. La máquina consta inicialmente de cuatro peones, un caballo y un alfil. Tiene dos partes: el propio bucle, que ocupa un cuadrado de 2×2 casillas, y un brazo de construcción, prominente hacia la derecha.

El caballo y el alfil representan la autodescripción. El caballo, cuya orientación importa, determina en qué dirección se va a crecer, mientras que el alfil va a su cola y determina la longitud que habrá de tener el lado del bucle. Los peones son relleno, que definen el resto de la forma del bucle, y la torre es una señal transitoria, destinada a guiar el crecimiento de un nuevo brazo de construcción.

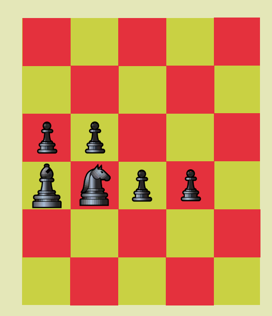
Con el paso del tiempo, el caballo y el alfil van circulando en torno al bucle en sentido antihorario. Cada vez que encuentran el brazo de construcción, una copia sale por el brazo, mientras que el original continúa recorriendo el bucle.

PARA JUGAR hacen falta dos tableros: uno para representar la configuración actual y otro donde preparar la siguiente. En cada ronda se examinan una por una las casillas de la configuración actual, se consultan las reglas y se coloca la pieza adecuada en la casilla homóloga del otro tablero. Cada pieza se metamorfosea de acuerdo con su identidad y las identidades de las cuatro casillas situadas inmediatamente a su izquierda, a su derecha, encima o debajo. La ronda termina una vez examinada cada casilla y establecida la nueva configuración. Se desmonta entonces la posición del primer tablero, y se repite todo el proceso.

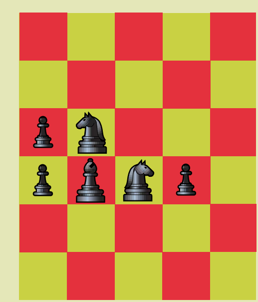
La dirección en que mira el caballo tiene significado. En los dibujos hemos utilizado los convenios habituales en ajedrez para indicar la orientación del caballo: el hocico apunta hacia adelante. De no haber ninguna regla explícitamente aplicable, el contenido de la casilla permanece intacto. Las casillas del borde deben tratarse como si tuvieran casillas adyacentes vacías en el exterior del tablero.

—M.S y J.A.R

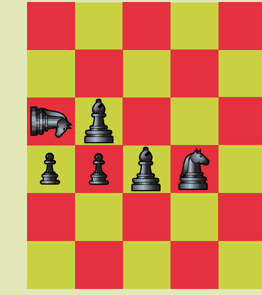
FASES DE LA REPLICACION



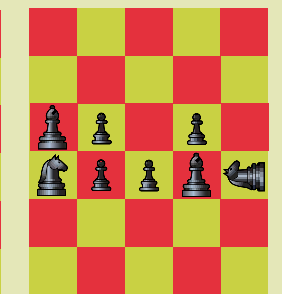
INICIALMENTE, la autodescripción, o “genoma” (un caballo seguido por un alfil), se sitúa en el arranque del brazo de construcción.



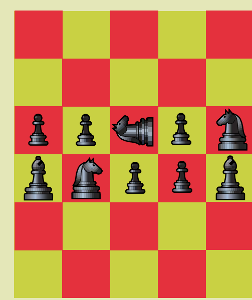
1 El caballo y el alfil se desplazan en sentido antihorario en torno al bucle. Un clon del caballo se dirige hacia la salida del brazo.



2 El par caballo-alfil primitivo continúa circulando. El alfil es clonado y sigue al nuevo caballo hacia la salida del brazo.



3 El caballo provoca la formación de dos vértices del bucle hijo. El alfil sigue a su cola, completando la transferencia de genes.



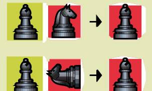
4 El caballo forja el vértice restante del bucle hijo. Los bucles están conectados por el brazo de construcción y por un “caballo andante”.

autómatas celulares actúan localmente, pero dan la impresión de que piensan globalmente. Lo mismo puede predicarse, en buena medida, de la biología molecular.

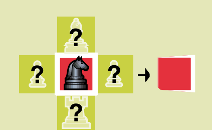
En un experimento computacional reciente, Jason Lohn, del Centro Ames de Investigación de la NASA, y Reggia no experimentaron con diferentes estructuras, sino con distintos conjuntos de reglas. Partiendo de un bloque arbitrario de cuatro componentes, descubrieron que podían determinar un conjunto de reglas capaz de instar la autorreplicación del bloque. El hallazgo de estas reglas se logró merced a un algoritmo genético, un proceso automatizado que remeda la evolución darwinista.

El aspecto más difícil de este trabajo consistió en la definición de la "función de adaptación", es decir, de los criterios para enjuiciar los sistemas de reglas, con el fin de seleccionar las soluciones idóneas y conducir el proceso evolutivo hacia sistemas de reglas que faciliten la replicación. No basta con asignar un alto grado de adaptación a los sistemas que determinan la replicación de una estructura, porque no es verosímil que ninguno de los conjuntos iniciales de reglas suscite la replicación. La solución consistió en idear una función de adaptación compuesta por la suma ponderada de tres medidas: una de crecimiento (grado en que cada tipo de componente engendra un creciente acopio de tal componente), una medida de la po-

CABALLO



SI HAY un alfil justo debajo o a la izquierda del caballo, se reemplaza el caballo por otro alfil.

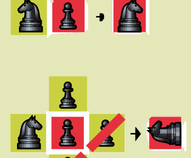


SI NO, de estar ocupada al menos una de las casillas vecinas, se retira el caballo y se deja vacía la casilla.

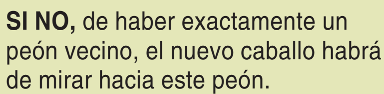
PEON

SI HAY un caballo vecino, se reemplaza el peón por un caballo orientado como se explica:

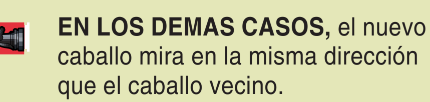
SI EL CABALLO vecino está orientado de espaldas al peón, el nuevo caballo habrá de mirar en sentido opuesto al del primero.



SI NO, de haber exactamente un peón vecino, el nuevo caballo habrá de mirar hacia este peón.

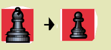


EN LOS DEMAS CASOS, el nuevo caballo mira en la misma dirección que el caballo vecino.





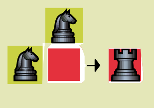
ALFIL O TORRE



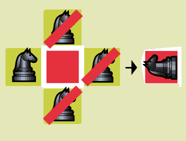


REEMPLAZAR por un peón.

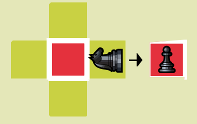
CASILLA VACIA



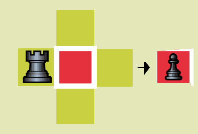
SI HAY dos caballos vecinos, y alguno de ellos mira hacia la casilla vacía, se ocupa esa casilla con una torre.



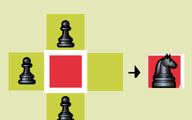
SI HAY solamente un caballo vecino, y éste mira hacia la casilla, se ocupa la casilla con un caballo girado 90º en sentido antihorario.



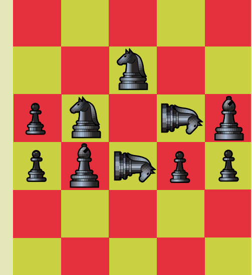
SI HAY un caballo vecino y su lado izquierdo mira hacia la casilla, estando vacías las demás casillas, se ocupa la casilla con un peón.



SI HAY una torre contigua, y las demás vecinas están vacías, se ocupa la casilla con un peón.

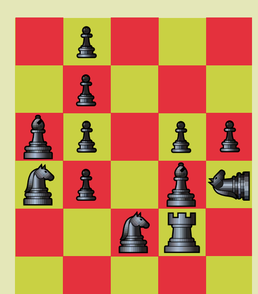


SI HAY tres peones contiguos, se ocupa la casilla con un caballo que mire hacia la cuarta casilla vecina vacía.



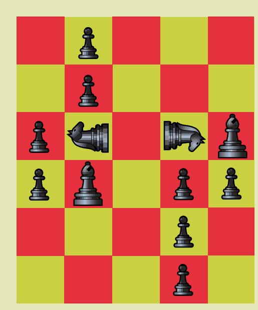
5 El caballero andante se desplaza hacia arriba para dotar de un brazo nuevo al progenitor. Un proceso similar, demorado un paso, comienza para el bucle hijo.

6 El caballero andante, junto con el par caballo-alfil original, conjura una torre. Entretanto, el brazo contiguo queda eliminado.



7 La torre mata al caballo y genera un brazo nuevo, ascendente. Otra torre se dispone a hacer lo mismo para el hijo.

8 Los dos bucles quedan finalmente separados y enteros. Las autodescripciones continúan circulando, pero en lo demás todo está en calma.



9 El padre se dispone a engendrar de nuevo. En el paso siguiente, también el hijo comenzará su replicación.

AUTORREPARACION DEL ROBOT

La autorreplicación artificial permite ordenadores capaces de reparar sus propias averías

LAUSANA (SUIZA).— No abundan los investigadores que animen a la destrucción caprichosa del equipo de sus laboratorios. Sin embargo, Daniel Mange ve con buenos ojos que sus visitas se acerquen a alguno de sus inventos y pulsen el botón KILL (matar). Se apagan las luces del panel: se ha quemado una cajita llena de circuitos. A primeros de mayo, su equipo desveló su último artilugio, un reloj de tamaño pared cuyos componentes se pueden manipular a capricho.

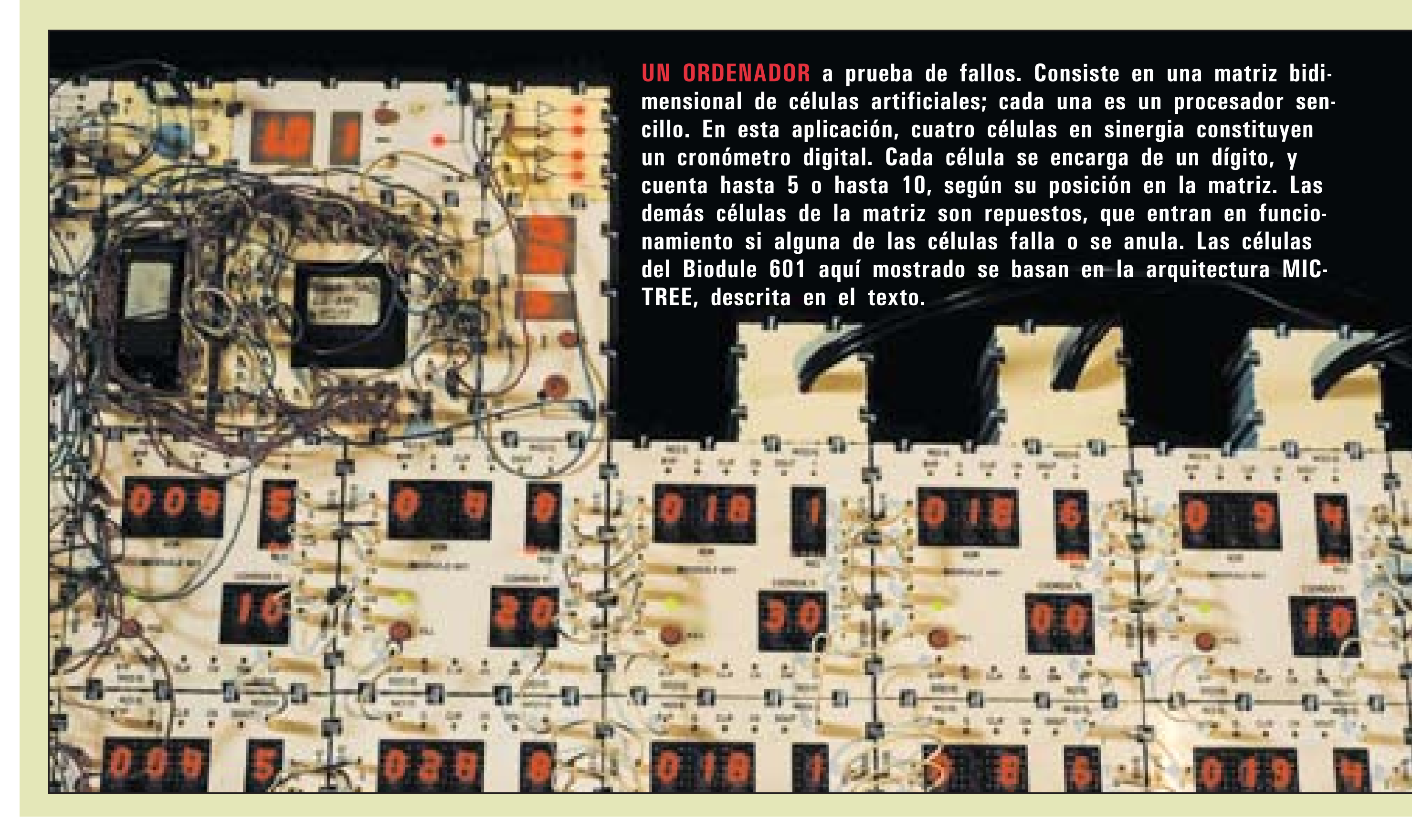
La meta de Mange y su equipo es imbuir en los circuitos electrónicos la capacidad de sufrir duros golpes y seguir funcionando, como los seres vivos. Las criaturas de carne y hueso pueden no ser muy diestras en el cálculo de un millón de cifras de π; en cambio, llegan al final del día sin que nadie se vea obligado a pulsar "Ctrl-Alt-Del". Uno de los grandes retos de la electrónica moderna estriba en combinar la precisión de los equipos digitales con la versatilidad de los sistemas biológicos.

Los ingenieros electrónicos han estado trabajando en circuitos capaces de soportar fallos desde el nacimiento mismo de su disciplina. Los módems usados en los ordenadores seguirían transmitiendo datos gota a gota, a 1200 baudios, de no ser por la detección y corrección de errores. Para muchas aplicaciones son suficientes sencillos controles de calidad, por ejemplo, bits de datos supernumerarios. En sistemas más complejos se instalan ordenadores enteros destinados a funciones de respaldo. Así, en la lanzadera espacial se utilizan cinco procesadores. Cuatro de ellos efectúan, por separado, el mismo cómputo; el quinto comprueba si todos coinciden. Lo malo de tales sistemas reside, empero, en que se fundan en un control centralizado. ¿Y si la unidad de control se avería?

La naturaleza ha resuelto este problema mediante una descentralización radical. Las células de un organismo son, en lo esencial, idénticas; cada una se encarga de una función determinada, la ejecuta de manera autónoma, y en caso de infección o de fallo, se autodestruye, para que sus tareas puedan ser desempeñadas por nuevas células. Estos son dos atributos que Mange, profesor en el Instituto Politécnico de Tecnología de Suiza, y otros vienen desde 1993 buscando emular en la circuitería, dentro del proyecto "Embriónica" (Embrión + electrónica).

Uno de sus primeros inventos, la célula artificial MICTREE (MICroinstruction TREE, árbol de microinstrucciones), consistía en un solo procesador y cuatro bits de almacenamiento de datos. La célula está contenida en una caja de plástico de unos 8 cm de lado. Sus costados están provistos de muescas con contactos eléctricos, que permiten acoplar unas células a otras. Las células del MICTREE, al igual que los autómatas celulares, que son los modelos estudiados para investigar la teoría de autorreplicación, están conectadas sólo con las vecinas inmediatas. La carga de comunicación que recae sobre cada célula es así independiente del número total de células. Con otras palabras, a diferencia de muchas arquitecturas de computación en paralelo, el sistema es fácil de realizar a mayor escala.

Las células obedecen a las instrucciones de su "genoma", que es un programa escrito en un subconjunto de Pascal (un lenguaje de programación). Lo mismo que las biológicas, estas células contienen todas el mismo genoma, y ejecutan una parte del mismo basándose en su posición dentro de la formación, que cada célula computa en relación con sus vecinas. Aunque el sistema parezca



UN ORDENADOR a prueba de fallos. Consiste en una matriz bidimensional de células artificiales; cada una es un procesador sencillo. En esta aplicación, cuatro células en sinergia constituyen un cronómetro digital. Cada célula se encarga de un dígito, y cuenta hasta 5 o hasta 10, según su posición en la matriz. Las demás células de la matriz son repuestos, que entran en funcionamiento si alguna de las células falla o se anula. Las células del Biodule 601 aquí mostrado se basan en la arquitectura MICTREE, descrita en el texto.

pródigo, tal redundancia permite a la matriz soportar la pérdida de cualquiera de sus células. Cuando se pulsa el botón KILL (matar) de alguna de ellas, esa célula se apaga, y sus vecinas de la izquierda y de la derecha quedan conectadas directamente. La vecina de la derecha recalcula su posición y comienza a ejecutar el programa de la extinta. Sus tareas son, a su vez, encomendadas a su célula vecina por la derecha, y así sucesivamente, hasta que se requiere que una de las células de reserva entre en servicio.

Si la confección de programas para cualquier procesador en paralelo es siempre delicada, la matriz MACTREE exige una metodología peculiar. En lugar de dar instrucciones explícitas, el programador debe idear reglas sencillas de las cuales resulte la función deseada. Siendo suizo, Mange no podía menos de construir un cronómetro digital superseguro. Para presentar los minutos y los segundos se requieren cuatro células en línea, una por dígito. El genoma consiente células de dos tipos: un contador de 0 a 9 y un contador de 0 a 5. Un oscilador inyecta un impulso por segundo en la célula de la derecha. Al cabo de 10 impulsos, esta célula repone su contador a 0 y envía un impulso a la situada a su izquierda; y así sucesivamente a lo largo de la línea. El reloj ocupa parte de una matriz de 12 células; cuando alguna “fallece”, el reloj se transplanta a sí mismo una célula más allá, y sigue funcionando. Obviamente, esta versatilidad no es ilimitada: el dispositivo acabará fallando tras un máximo de ocho decesos.

Las células del prototipo MICTREE están cableadas; su capacidad de procesamiento no puede, pues, confeccionarse a la medida de una aplicación específica. En un producto acabado, se implantarían las células sobre una matriz programable de puertas de efecto de campo, una plantilla de componentes electrónicos que puede reconfigurarse sobre la marcha [*veáse* “Computación configurable”, por John Ciencia, agosto de 1997]. El equipo de Mange está diseñando ahora una matriz de puertas “a la medida”, denominada MUXTREE (árbol multiplexador), que está optimizada para células artificiales. En la metáfora biológica, los componentes de esta formación son las “moléculas” que constituyen una célula. Cada una consta de una puerta lógica, un bit de datos y una cadena de bits de configuración que determina la función de esta puerta.

La construcción de células a partir de tales moléculas ofrece no sólo flexibilidad, sino también una mayor resistencia y robustez. Cada molécula contiene dos copias de la puerta, y tres del bit de almacenamiento. Si las dos puertas ofrecieran resultados diferentes, la molécula se inmolaría en beneficio de la célula. En su último servicio, la molécula envía su bit de datos (que se ha preservado merced al almacenamiento por triplicado) y su configuración a su vecina por la derecha, la cual hace lo mismo; el proceso continúa hasta que la molécula en posición derecha extrema transfiere sus datos a una de reserva. Este segundo nivel de tolerancia a los fallos impide que un solo error borre una célula entera.

Un total de 2000 moléculas, agrupadas en cuatro células de 20 por 25, componen el BioWall, un gigantesco reloj digital que ha exhibido el equipo de Mange. Cada molécula está encerrada en una cajita; dispone de un botón KILL y una pantalla de diodos luminiscentes (LED). Ciertas moléculas están configuradas para efectuar cómputos; otras sirven de píxeles de la pantalla del reloj. Utilicé a discreción los botones KILL para averiar el sistema. Pero el reloj, tenaz, no cedía. La pantalla del reloj empezó a mostrar un aspecto curioso, con las cifras sesgadas al ir desplazándose sus píxeles hacia la derecha, pero al menos era legible, a diferencia de la mayoría de los rótulos electrónicos.

Dicho esto, el sistema sí ofrecía errores de presentación, que Mange atribuyó, sobre todo, a problemas de sincronismo. Aunque la capacidad de procesamiento está descentralizada, las células siguen dependiendo de un oscilador central para coordinar sus comunicaciones; en ocasiones pierden el sincronismo. Otro equipo de embriónica, dirigido por Andy Tyrrell, de la Universidad de York, trata de hacer que las células sean asíncronas, como sus homólogas biológicas. Las células habrían de generar señales de mutuo reconocimiento para orquestar las transferencias de datos. El sistema actual se muestra también incapaz de atrapar errores de ciertos tipos, entre ellos, cadenas de configuración deterioradas. El equipo de Tyrrell ha propuesto añadir moléculas “de vigilancia” —un sistema inmunitario— que estarían encargadas de supervisar las configuraciones (y unas a las otras) buscando defectos.

Aunque todos estos sistemas exigen una enorme cantidad de recursos, lo mismo ocurre con otras técnicas resistentes a los fallos. “Si bien la embriónica parece depender mucho de la redundancia, la cosa no es tan grave si se la compara con otros sistemas”, aduce Tyrell. Además, el sistema MUXTREE debería resultar más sencillo de miniaturizar a nanoescala: sus “moléculas” son lo bastante sencillas para poder ser verdaderas moléculas. Dice Mange: “Nos estamos preparando para cuando la electrónica opere a la misma escala que la biología”.

En su concepción, la embriónica se aproxima de cerca al sueño de construcción de una máquina autorreplicante. Quizá no resulte tan impresionante como un robot capaz de ir a un almacén de componentes electrónicos, seleccionar allí los elementos necesarios y llevárselos a casa para restablecer una conexión o para construirse un compañero. Pero el efecto es muy similar.

—George Musser

sición relativa (grado en que permanecen juntos componentes que son vecinos) y una medida replicante (función del número de replicadores reales presentes). Con una función de adaptación idónea, la evolución puede tornar fecundos a sistemas de reglas que son estériles; el proceso suele requerir unas 150 generaciones.

Las estructuras autorreplicantes descubiertas por este procedimiento operan de modo esencialmente distinto al de los bucles autorreplicantes. Por ejemplo, trasladan y depositan copias a lo largo del camino, a diferencia de los bucles replicantes, que son básicamente estáticos. Y aunque estos replicadores de nuevo cuño constan de componentes múltiples y localmente interactuantes, carecen de una autodescripción identificable: no hay en ellos un genoma obvio. La capacidad de replicación sin autodescripción puede revestir interés en cuestiones relativas a la forma en que se originaron los replicadores biológicos primitivos. Los investigadores están, en cierto sentido, viendo un continuo entre las estructuras dotadas de vida y las estructuras carentes de ella.

Además de los autómatas celulares tradicionales, se han ensayado modelos de otros tipos. En los autómatas celulares asíncronos, las células no se actualizan en concierto; en los autómatas celulares no uniformes, las reglas pueden variar de unas casillas a otras. Tenemos otro planteamiento entera-



3. SI ALGUN DIA las máquinas autorreplicantes se convirtieran en una realidad práctica, plantearán cuestiones muy delicadas. Contra augurios negativos, los autores prefieren creer que la autorreplicación se pondrá al servicio de la humanidad. Así lo ha visto el artista en la "recreación de una manzana".

mente distinto en la Guerra Nuclear [*véase* "Juegos de ordenador", por A. K. Dewdney, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984] y su prole, como el sistema Tierra del ecólogo Thomas S. Ray. En estas simulaciones, los "organismos" son programas de ordenador que compiten para hacerse con memoria y tiempo de procesado. Ray ha observado la aparición de "parásitos" que "se apropian" del código de autorreplicación de otros organismos.

Hacia la realidad

Así pues, ¿de qué sirven estas máquinas? El constructor universal de von Neumann no sólo está capacitado para replicarse, sino también para calcular, pero es una bestia poco dócil. De ahí que el desarrollo de replicadores sencillos y útiles haya significado un gran avance. En 1995, Gianluca Tempesti, del Instituto Politécnico de Lausana, simplificó la autodescripción del bucle y consiguió entrelazarlo con un pequeño programa. (Deletreaba éste el acrónimo —LSL— del laboratorio.) Su idea consistió en crear para el autómata unas reglas que permiten a los bucles replicarse en dos etapas. En la primera, el bucle, lo mismo que el bucle de Langton, efectúa una copia de sí mismo. Una vez concluida, el bucle hijo devuelve una señal a su progenitor, quien, a partir de ese momento, envía las instrucciones para representar las letras.

El trazado de las letras era solamente una demostración. Al año siguiente Jean-Yves Perrier, Jacques Zahnd y uno de los autores (Sipper) diseñaron un bucle autoreplicante con capacidad de computación universal, es decir, con la potencia computacional de una máquina de Turing universal, un ordenador sumamente simplificado si bien capaz de computar todo cuanto sea computable. Este bucle consta de dos "cintas" —dos largas ristras de componentes—, una para el programa y otra para los datos. Además de autorreplicarse, los bucles pueden ejecutar un programa arbitrariamente dado. En cierto sentido, pues, presentan una complejidad equiparable a la del ordenador que los simula. Su principal limitación es que el programa sea copiado sin modificación desde el bucle progenitor al filial, a causa de lo cual todos los bucles llevan a cabo el mismo conjunto de instrucciones.

Tal limitación fue eliminada por Chou y Reggia en 1998. Idearon cómo utilizar bucles autorreplicantes portadores de distinta información, en lugar de un programa clonado, para resolver el "problema de satisfactibilidad". Se pueden emplear los bucles para determinar si es posible asignar, a las variables de una expresión lógica, valores individuales tales que el valor resultante para la expresión completa sea "verdadera". Este problema es NP-completo; pertenece a una familia de espinosos problemas, entre ellos el célebre del viajante, para los que no se conoce una solución eficiente. En el universo del autómata celular de Chou y Reggia, cada replicador recibió una solución parcial diferente. Durante la replicación, las soluciones mutaron, y se permitió la proliferación de los replicadores con soluciones prometedoras, mientras que los que ofrecieron soluciones fallidas se extinguieron.

Aunque son varios los equipos que han creado autómatas celulares materializados en circuitos electrónicos, es probable que tales sistemas resulten demasiado onerosos para las aplicaciones prácticas; nunca se tuvo verdadera intención de construir materialmente autómatas celulares. Su finalidad es la de arrojar luz sobre los principios subyacentes a la replicación y, por esta vía, servir de inspiración para esfuerzos más concretos. Los bucles proporcionan un nuevo paradigma para diseñar un ordenador de funcionamiento en paralelo, sea mediante transistores o sirviéndose de compuestos químicos [*véase* "Computación con ADN", por Leonard M. Adleman, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1998].

En 1980, un equipo de la NASA, dirigido por Robert Freitas Jr., propuso la implantación en la Luna de una factoría que se replicara por sí misma, utilizando materiales lunares locales, con el fin de poblar exponencialmente una gran extensión. De hecho, una sonda similar podría llegar a colonizar la galaxia entera, ha defendido el físico Frank J. Tipler, de la Universidad de Tulane. Científicos e ingenieros informáticos han empezado ya a experimentar en el diseño automatizado de robots. Aunque tales sistemas no sean verdaderamente autoreplicantes, pues su progenie es mucho más sencilla que los progenitores, sí suponen un primer paso para atender la demanda de la reina de Suecia.

Si las máquinas autorreplicantes se convirtieran en una realidad práctica, ellas y las técnicas afines plantearán difíciles cuestiones. Contra augurios negativos, los autores prefieren creer que la autorreplicación se pondrá al servicio de la humanidad [*véase* "¿Serán los robots quienes hereden la Tierra?", por Marvin Minsky, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1994]. La clave consistirá en seguir el consejo que ya diera en el siglo XIV el filósofo inglés Guillermo de Ockham: *entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* (los seres no se han de multiplicar más de lo necesario).

Bibliografía complementaria

SIMPLE SYSTEMS THAT EXHIBIT SELF-DIRECTED REPLICATION. J. Reggia, S. Armentrout, H. Chou e Y. Peng, en *Science*, vol. 259, n.º 5099, páginas 1282-1287; 26 de febrero de 1993.

EMERGENCE OF SELF-REPLICATING STRUCTURES IN A CELLULAR AUTOMATA SPACE. H. Chou y J. Reggia en *Physica D*, vol. 110, n.º 3-4, páginas 252-272; 15 de diciembre, 1997.

SPECIAL ISSUE: VON NEUMANN'S LEGACY: ON SELF-REPLICATION. Compilación de M. Sipper, G. Tempesti, D. Mange y E. Sánchez en *Artificial Life*, vol. 4, n.º 3; verano de 1998.

TOWARDS ROBUST INTEGRATED CIRCUITS: THE EMBRYONIC APPROACH. D. Mange, M. Sipper, A. Stauffer y G. Tempesti en *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, n.º 4, páginas 516-541; abril de 2000.

El accidente de las minas de Aznalcóllar

El mayor desastre ambiental ocurrido en España se produjo en las inmediaciones de una de las áreas protegidas más emblemáticas de Europa. Sus efectos negativos en el ecosistema ponen de manifiesto la necesidad de un mayor rigor en el control ambiental de las actividades mineras e industriales

Enrique Macpherson, Miguel Ferrer y Joan Grimalt

La catástrofe ocurrida en la mina de Aznalcóllar en la madrugada del 25 de abril de 1998 es, sin lugar a dudas, el mayor desastre ambiental ocurrido en España y uno de los más graves de Europa occidental, no sólo por su magnitud, sino también por haberse producido en las proximidades de uno de los parajes naturales más importantes de Europa: el Parque de Doñana. Después de tres años del accidente conviene hacer balance y analizar sus causas, sus efectos y las lecciones que debemos extraer para el futuro.

La comarca de Doñana está situada en el área próxima a la desembocadura del río Guadalquivir, en las provincias de Huelva, Sevilla y Cádiz. Comprende una extensa zona de marismas, con lucios, lagunas y caños, así como zonas de dunas, pinares, matorrales y pastos y una agricultura rica y variada. Desde 1978, unas 50.000 Ha están protegidas bajo la figura de Parque Nacional, declarado Reserva de la Biosfera en 1981 y, en 1994, Patrimonio de la Humanidad. En sus límites norte, este y sur se encuentra el Parque Natural, con una extensión de 54.000 Ha adicionales.

En Doñana están representadas 803 especies de plantas fanerógamas, con algunos endemismos. La fauna de vertebrados cuenta con 37 especies de peces, 12 de anfibios, 19 de reptiles y 29 de mamíferos. Mención aparte merece la avifauna que, con 361 especies, supone un 70 % del total de las especies presentes en Europa.

Se refugian allí varias especies amenazadas, únicas en Europa, como el lince ibérico (*Lynx pardina*) y el águila imperial (*Aquila adalberti*), que son endémicas del cuadrante suroccidental de la península Ibérica, y de la focha cornuda (*Fulica cristata*), la cerceta pardilla (*Marmaronetta angustirostris*) y la malvasía (*Oxyura leucocephala*).

De los ecosistemas de Doñana, la marisma es uno de los principales. Su elevada productividad le permite mantener importantes poblaciones de aves acuáticas, invernantes o nidificantes. En años favorables, la población de aves acuáticas invernantes puede superar los 700.000 ejemplares.

El sistema acuático de Doñana se alimenta de aportes pluviales y de aguas superficiales desde el norte (arroyos de la Rocina y del Partido), el este (río Guadiamar) y el sur y oeste (océano Atlántico). Antaño la cuenca del Guadiamar aportaba la mitad del agua que entraba en la marisma, pero este sistema natural ha sufrido drásticas modificaciones en fechas recientes.

Los autores

ENRIQUE MACPHERSON, MIGUEL FERRER y JOAN GRIMALT han participado, desde puestos de responsabilidad, en la gestión del desastre de Aznalcóllar. Macpherson, profesor de investigación del Centro de Estudios Avanzados de Blanes, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), trabaja en ecología marina. Ferrer, científico titular de la Estación Biológica de Doñana, del CSIC, dirigía la Estación cuando ocurrió el vertido tóxico y ha tenido un papel destacado en el control y estudio del vertido y sus consecuencias sobre las especies del Parque de Doñana. Grimalt, profesor de investigación del Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales, del CSIC, investiga en los efectos de los agentes contaminantes orgánicos en los ecosistemas y en el hombre.

En el pasado, las aguas del río Guadiamar, último de los grandes afluentes que recibe el Guadalquivir por su margen derecha, entraban en la marisma a través de varios caños, y la inundaban durante las crecidas. En los años setenta del siglo pasado se encauzó el último tramo del río, la zona de Entremuros, y la mayoría del agua se desvió directamente hasta el Guadalquivir, cerca ya de su desembocadura. Ahora sus aguas sólo penetran en el Parque Nacional durante las crecidas.

En su tramo medio, el Guadiamar cruza una franja pirítica donde se sitúa una tradición minera anterior a la dominación romana. Dentro de su cuenca, se hallan las minas de Aznalcóllar, a cielo abierto y dedicadas a la extracción de zinc (Zn), cobre (Cu) y otros metales; los residuos desechados se acumulan en balsas que ocupan una superficie de unas 12 Ha. Las minas de Aznalcóllar son propiedad, desde 1987, de la empresa sueco-canadiense Boliden-Apirsa. La rotura de la balsa de residuos de una de las cortas mineras, los Frailes, con un potencial estimado de 50 millones de toneladas de mineral, fue la causante del desastre.

Para extraer los metales de interés debe pulverizarse y lavarse el mineral, lo que origina un enorme volumen de aguas ácidas. Estas, junto con los fangos residuales, finamente pulverizados en el proceso, se almacenan en balsas. Por la propia naturaleza de la pirita, el polvillo desmenuzado tiene un alto contenido en metales y metaloides. Las aguas de la balsa, depuradas, suelen verterse a un cauce fluvial, que en el caso de Aznalcóllar es al río Agrio, tributario del Guadiamar.

La balsa de residuos fue construida en 1974 por Dragados y Construcciones, S.A., e impermeabilizada hasta 5 metros sobre su base. Desde 1985, las empresas que gestionaron la mina fueron agrandando sus dimensiones, al aumentar el ritmo de explotación. Así, en el momento de la rotura, la balsa se alzaba unos 25 metros sobre su base.

El accidente y primeras consecuencias

La rotura de unos 50 metros del muro de contención de la balsa de almacenamiento de residuos provocó el vertido de unos seis millones de metros cúbicos de lodos y aguas ácidas sobre el río Agrio. La riada tóxica bajó por el este y el Guadiamar, inundando todas las tierras de su alrededor en una franja de hasta 500 m de anchura. En las zonas próximas a la mina la riada alcanzó una altura de hasta

1. BALSA DE RESIDUOS en la explotación minera de Aznalcóllar (Sevilla). La rotura del muro de contención de la balsa (*parte superior izquierda*) medía más de 50 metros de longitud, con un desplazamiento horizontal del muro que llegaba a los 60 metros. El contenido de la balsa estaba constituido por residuos de los procesos de flotación de pirita y agua con numerosos metales en disolución.





2. CAMPOS DE CULTIVO de la cuenca del Guadiamar. Se vieron afectados nueve municipios: Aznalcóllar, Olivares, Sanlúcar la Mayor, Benacazón, Huévar, Aznalcázar, Villamanrique de la Condesa, Villafranco del Guadalquivir y Puebla del Río. En total se inundaron más de 4000 hectáreas, de las cuales más de 3000 Ha eran de uso agrícola. Los daños por pérdida de cosechas se valoraron en 1675 millones de pesetas.

3 m, decreciendo a medida que avanzaba la avenida. En la balsa minera quedaron unos 25 millones de metros cúbicos de fangos y aguas.

El muro cedió ante la alta densidad del lodo almacenado, que provocaba una fuerte presión sobre las margas situadas bajo la balsa. Esta elevada presión se transmitió hacia las discontinuidades de las margas (interestratos), provocando una reducción del peso efectivo de la pared de la balsa (como si "flotara"). Ante esta pérdida de peso efectivo, el empuje horizontal de los lodos superó la resistencia de la pared y provocó la rotura.

Dos millones de metros cúbicos de lodo recorrieron unos 40 km, decantándose progresivamente por el lecho y riberas del río Guadiamar, hasta el inicio de Entremuros, donde el espesor depositado fue mínimo. Pero cuatro millones de metros cúbicos de aguas ácidas (*p*H cercano a 3) avanzaron otros 30 km más, hasta que las detuvieron varios diques construidos urgentemente, el último a las puertas mismas del Parque Nacional. Una parte del agua, que no pudo contenerse, llegó al estuario del Guadalquivir.

La superficie afectada por la riada tóxica fue de algo más de 4000 Ha, de las cuales unas 2500 eran tierras de cultivo. Un total de 2656 Ha del Parque Natural y 98 Ha del Parque Nacional (4,2 % y 0,19 % de su superficie total, respectivamente) se vieron cubiertas por aguas y lodos tóxicos.

Los lodos vertidos se caracterizaban por una granulometría muy fina (el 50 % de las partículas sólo tenían de cuatro a 12 micras), resultante del tratamiento que sufre la pirita. Presentaban, además, un elevado contenido en metales pesados [zinc (8 gr/kg), plomo (8 gr/kg), arsénico (5 gr/kg), cobre (2 gr/kg), antimonio (0,5 gr/kg) talio (55 gr/tm) y cadmio (28 gr/tm)]. A los que había que añadir pequeñas cantidades (4-10 gr/tm) de aminas aromáticas e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

La fina granulometría facilitaba la rápida meteorización de los lodos piríticos, una vez secos. Se formó una costra de sulfatos complejos hidratados, derivados de la oxidación de las sulfosales, acoplada a un mecanismo de transporte capilar. Las costras acumulaban zinc, cadmio, manganeso, níquel y cobalto en concentraciones enriquecidas con respecto a los lodos piríticos.

La entrada masiva de agua tóxica produjo una elevada mortalidad en el ecosistema acuático debido al bajo *p*H, elevadísima concentración de sólidos en suspensión y escasez de oxígeno disuelto. Las especies más afectadas fueron las carpas, albures, barbos, anguilas, black-bass y cangrejos. Para evitar males adicionales, se prohibió la pesca en más de 20 km de canales cercanos al río Guadalquivir.

El consumo inmediato de los cadáveres por predadores hizo temer casos de intoxicación letal y que se tornase inevitable la entrada de metales pesados en la cadena trófica, a través, sobre todo, de aves piscívoras y especies filtradoras que habitan en los ríos y el estuario. Además del efecto a medio-largo plazo en el ecosistema por esa vía, se arruinaron unos 1000 huevos de aves acuáticas por la subida del nivel del agua y la pérdida de hábitat. Bajo el agua tóxica quedaron unas 1200 hectáreas de una zona de cría fundamental para las aves.

El vertido tóxico cruzó en su recorrido de norte a sur una franja de suelos arenosos que es zona de recarga del acuífero 27, el principal del contorno. Los análisis iniciales detectaron la contaminación de pozos en los que el vertido entró por desbordamiento o filtración superficial. Se contaminó también el acuífero aluvial.

De los análisis de los suelos afectados, pocos días después del vertido, se desprendía que, en los arcillosos (que forman la mayor parte de la zona atravesada por el vertido), la contaminación alcanzó niveles importantes en los 5 primeros centímetros, aunque su presencia podía en ocasiones detectarse hasta 10 cm de profundidad. En suelos arenosos, dominantes en la zona cercana a la mina, la contaminación penetró con fuerza hasta 30 cm, pero sus secuelas alcanzaban el medio metro.

Actuaciones preventivas

Se creó un comité científico de asesoramiento y se establecieron medidas para reducir el efecto de la contaminación. Se prohibieron la caza y la pesca en la cuenca del Guadiamar, así como la comercialización de los productos agrícolas. No empezó la retirada sistemática de los lodos hasta el mes de julio, terminando en octubre. El lodo depositado en el cauce y en zonas marginales se fue eliminado durante 1999. El agua tóxica almacenada en Entremuros pasó por una depuradora, antes de verterla al cauce del Guadalquivir.

Puesto que los suelos persisten contaminados incluso después de la retirada de los lodos, se ha decidido transformar el área afectada en un "corredor verde", que conectará el Parque de Doñana con otras zonas protegidas (Sierra de Aracena y Picos de Aroche).

Efecto sobre el ecosistema y evolución temporal

Los lodos procedentes de la mina estaban compuestos en un 68-78 % de pirita, con pequeñas cantidades de minerales arcillosos, cuarzo y calcita, entre otros. La mayor parte de las fases minerales portadoras de metales pesados y metaloides eran calcopirita, esfalerita, galena y arsenopiritas.

La granulación fina y toxicidad de los metales arrastrados en los lodos constituían serios peligros para la salud humana y de los animales. Se corría riesgo también de que el polvo tóxico producido por metereorización o levantado en los trabajos de limpieza se expandiera hacia zonas colindantes. La oxidación de la costra superficial de los lodos, como resultado de los procesos químicos y bacterianos, originaba una extensa lámina blanquecina de sulfatos. Una gran parte de estos sulfatos desaparecieron durante el verano de 1998 disueltos por el rocío y por la erosión eólica.

Contaminación atmosférica

Los niveles de partículas atmosféricas en suspensión se mantuvieron bajos en mayo-junio (49 y 66 μg/m^3, respectivamente, en la zona de Aznalcázar). Una débil convectividad atmosférica favoreció el grado limitado de resuspensión de partículas de pirita.

3. AGUAS ACIDAS RETENIDAS por diques de contención en la zona de Entremuros. Quedaron retenidos inicialmente unos 2,5 hm^3 y se desaconsejó su descarga al Guadalquivir sin tratamiento previo, basándose en su alta concentración de metales pesados y en la acidez del agua, cuya liberación al río podría haber dañado al ecosistema. Como consecuencia del cierre total y el aporte de escorrentías procedentes de las lluvias posteriores al cierre, se acumularon más de 5 hm^3 de aguas contaminadas. Aunque se recomendó un tratamiento químico de choque para la neutralización de la acidez y la precipitación de hidróxidos de metales pesados, no se llevó a cabo. La evolución del agua embalsada experimentó un notable incremento de la acidez debido a la precipitación de oxihidróxidos de hierro inicialmente disuelto y al lixiviado de los lodos piríticos. Finalmente se decidió utilizar una depuradora para eliminar los contaminantes.





4. TRAS EL VERTIDO quedaron inundados todos los hábitats incluidos en el cauce fluvial y en el entorno del río. En los primeros días desapareció la fauna acuícola del río Guadiamar, principalmente carpas, albures y barbos y, en menor proporción, anguilas, ranas y cangrejos. Los animales murieron por asfixia, debida a la fina granulometría de los lodos y a la falta del oxígeno disuelto.

Pero durante el verano la dinámica convectiva, unida a las condiciones de sequedad en las que se realizaron las operaciones de limpieza originaron un fuerte incremento del nivel de partículas en la atmósfera (hasta máximos de 490 $\mu g/m^3$). Luego, el nivel descendió (118 $\mu g/m^3$ en septiembre y 70 $\mu g/m^3$ en octubre, como valores medios). En noviembre y diciembre de 1998 la media diaria quedó en niveles similares a los iniciales de mayo (media diaria de 32 y 54 $\mu g/m^3$ de partículas totales en suspensión, respectivamente, por debajo del nivel medio anual permitido de 150 $\mu g/m^3$).

A partir de febrero de 1999, los niveles se mantuvieron estables. Se contabilizaron los valores previos a los trabajos de restauración de los suelos y correspondientes a zonas con bajos niveles de contaminación. La única alteración concernía al cobre, que registró en ocasiones niveles muy elevados, asociados a los trabajos de fumigación habituales en la zona y no al vertido.

Suelos

La textura, *p*H, contenido en materia orgánica, carbonato cálcico, oxihidróxidos de hierro y otras características de los suelos condicionan la capacidad de amortiguación e inmovilización de los elementos contaminantes. Difieren de una zona a otra. La zona próxima a la mina tiene una mayor proporción de arenas y gravas, mientras que en la parte final, cercana a Entremuros, dominan los terrenos arcillosos y calcáreos.

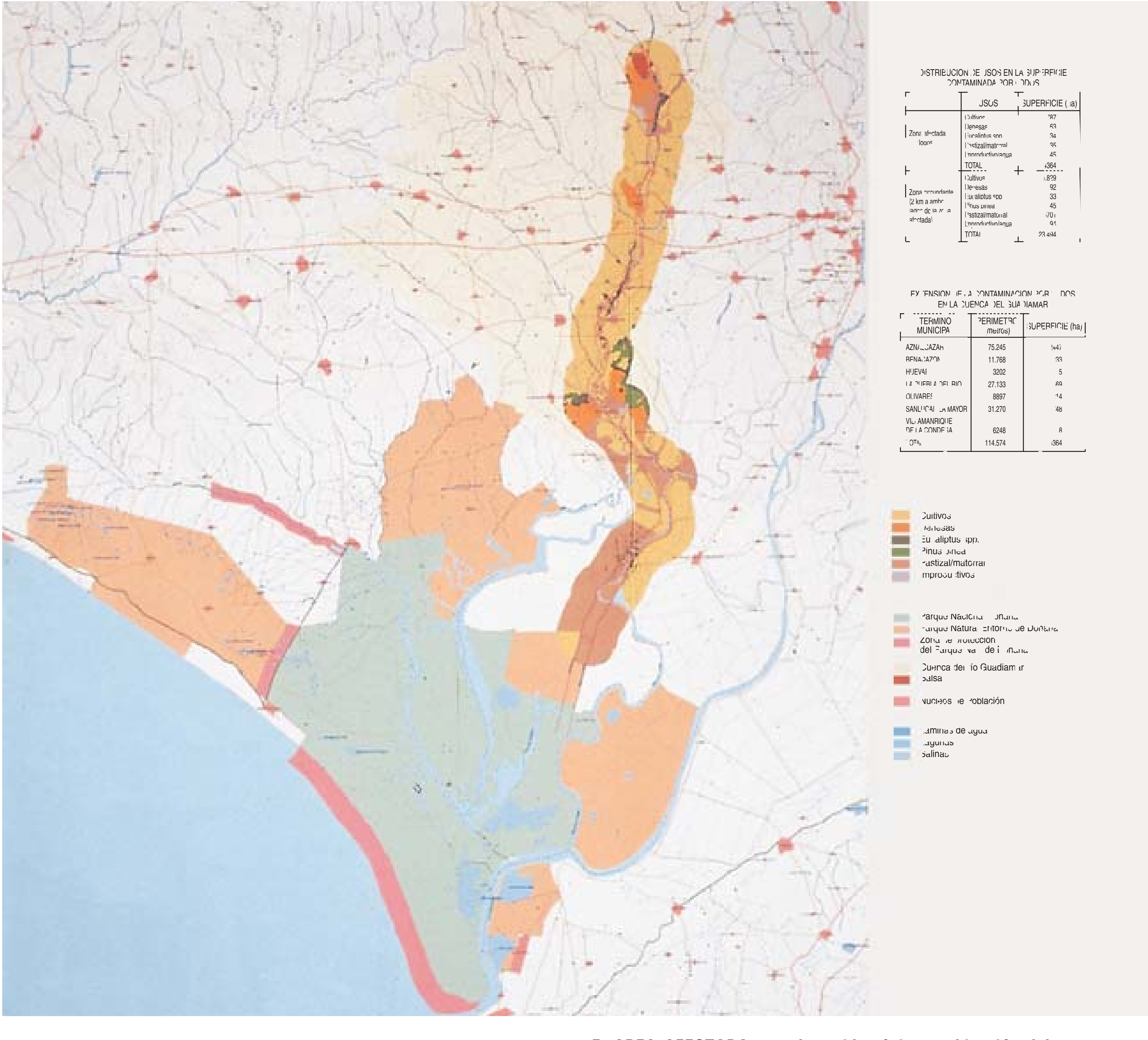
La contaminación de los suelos se produjo por una triple vía: la penetración de los metales disueltos presentes en las aguas ácidas de la riada; la penetración mecánica de los lodos a través de grietas y poros, y los procesos de lavado de sales procedentes de la progresiva oxidación de los lodos depositados sobre la superficie de los suelos. Por esta ultima vía penetró más del 50 % de la contaminación.

La contaminación principal se debió a múltiples elementos metálicos presentes en los lodos; en particular, cobre, zinc, arsénico, cadmio, antimonio, talio y plomo. El resto de los elementos en las aguas y lodos del vertido no alcanzaron concentraciones significativas.

Una vez acabada la primera limpieza, a principios del otoño de 1998, se analizó el estado los suelos. Se distinguían dos zonas. Desde el puente de las Doblas hacia la zona de Entremuros, los valores de *p*H no bajaban de la neutralidad, encontrándose cantidades importantes de carbonato cálcico, sales, arcilla y, en general, todos los factores del suelo que influyen positivamente en el poder neutralizante de residuos ácidos. Dicha zona podía considerarse la de menor peligro de movilización de contaminantes inorgánicos.

La segunda zona, desde el puente de las Doblas hacia Aznalcóllar, presentaba una gran heterogeneidad. En unas áreas el *p*H alcanzaba valores de 7, en otras la acidez no sobrepasaba el valor de 5 y había otras en que no llegaba a 3. Es decir, existían ambientes hiperácidos, ácidos y neutros. Además, la textura del suelo es más ligera que en la zona primera y el contenido en carbonato cálcico es muy bajo o nulo. El análisis del contenido de contaminantes inorgánicos mostró valores que superaban los admitidos por cualquier normativa legal existente, para el caso del Zn (aproximadamente el 47 % de la zona afectada por el vertido estaba contaminada), del As (alrededor del 68 %), del Cd (4 %), Tl (11 %) y del Pb (25 %).

Todo ello obligó a realizar sucesivas labores de limpieza, que eliminaron suelo fértil, aunque la situación ha mejorado con el acarreo de tierras procedentes de otros puntos. No obstante, sigue existiendo una concentración elevada de arsénico. Se están añadiendo ahora minerales absorbentes (zeolitas) con resultados prometedores, que podrían neutralizar la



5. AREA AFECTADA por el vertido tóxico y ubicación del Parque de Doñana.

contaminación remanente. De la clara mejora de las condiciones edáficas nos habla la evolución de la infauna; los nematodos pasaron en al año 2000 a una media de 432 individuos por kilogramo de suelo, frente a los 97 de 1999.

Aguas subterráneas

De los acuíferos que hay en la región destaca el de Almonte-Marismas, con 4500 Ha; abastece a uno de los humedales más importantes de Europa. Tiene dos partes interconectadas: un acuífero freático en el N y O del Guadalquivir (2700 Ha) y un acuífero confinado (unas 1800 Ha) debajo del primero. El acuífero aluvial del Guadiamar es bastante estrecho (0,2-3 km de ancho y unos 30 km de largo) y tiene un grosor de 10-20 m. Fue uno de los más afectados por el vertido, al recorrer la avenida tóxica por el cauce del río. Hasta hace unas décadas el acuífero aluvial drenaba los acuíferos de Almonte-Marismas y de Aljarafe, pero desde hace 15 años el intenso bombeo para riego de estos dos grandes acuíferos invirtió el drenaje, de tal forma que el agua del aluvial pasa hacia los acuíferos. Esta inversión, unida a la posible contaminación del aluvial del Guadiamar, hacía previsible la contaminación de ambos macroacuíferos, con las consiguientes consecuencias catastróficas para la región.

La rotura de la balsa ocasionó la inundación por lodos piríticos y agua ácida de la totalidad del aluvial del río Agrio aguas abajo de la mina y de la mayor parte del aluvial del río Guadiamar, entre su intersección con el río Agrio y su encauzamiento en



6. DISTRIBUCION Y ESPESOR del lodo tóxico en las cuencas de los ríos Agrio y Guadiamar tras el vertido.

la zona de Entremuros. El alto porcentaje de agua en el lodo, su densidad y el hecho de que el acuífero aluvial de los ríos Agrio y Guadiamar sea una formación estrecha (50-200 m), alargada (unos 45 km) y de escaso espesor (5-20 m), con el nivel freático bastante somero, hizo temer, en un primer momento, que se produjera una infiltración rápida de agua de los lodos en la zona saturada, con riesgo de contaminación de los numerosos pozos agrícolas en él ubicados.

Los primeros análisis de aguas subterráneas realizados a los pocos días del accidente revelaron la contaminación de numerosos pozos. Pero se trataba de la contaminación del propio pozo y no del medio acuífero, causada por la invasión directa del brocal por lodo y agua ácida. La mayoría de estos pozos, de gran diámetro (1-2 m), poca profundidad (menos de 15 m) y abiertos, fueron limpiados entre junio y septiembre de 1998 mediante la remoción y extracción del lodo y agua y la adición de cal. Sólo en alguno de ellos se volvió a observar un aumento de la contaminación entre septiembre de 1998 y octubre de 1999. El resto mantuvo valores de *p*H y concentraciones de metales semejantes a los de los pozos sin contaminar de la zona, apoyando así la hipótesis de contaminación local.

Esta hipótesis de la invasión directa de los pozos se confirmó tras los análisis ulteriores, que ponían de manifiesto la retención de la mayor parte de los metales en las arcillas y materia orgánica del suelo. Como se ha dicho ya, los metales se concentraron entre los 5 y los 50 cm superficiales del suelo a lo largo del aluvial del Guadiamar. No obstante, creíase en la posibilidad de una infiltración de metales hasta la zona saturada del acuífero, de forma más o menos diferida, allí donde la textura de los sedimentos aluviales es gruesa (gravas y arenas) y el recubrimiento de limos muy delgado o casi inexistente, como es el caso del aluvial del Agrio y parte más alta del aluvial del Guadiamar.

Los estudios confirmaron la contaminación por metales y agua ácida de buena parte de la terraza más reciente del acuífero aluvial del río Agrio, entre aproximadamente la zona frente a la balsa y la confluencia con el río Guadiamar. En esta zona los valores de *p*H del agua subterránea eran y son muy ácidos, y oscilan entre 2,8 y 4,6, con concentraciones de Zn (uno de los mejores trazadores de la contaminación) entre unos pocos mg/l y casi 200 mg/l. Aguas abajo de la confluencia Agrio-Guadiamar los valores de *p*H del agua subterránea alcanzan niveles normales, oscilando entre 6,5 y 7,8. El resto del acuífero no se ha contaminado.

Comunidades del río Guadiamar

El río Guadiamar, en la zona no afectada por el vertido, lleva un agua bastante limpia, con valores bajos de conductividad, fosfatos, nitritos, amonio y sólidos en suspensión. La alcalinidad es alta, debido sobre todo a la naturaleza calcárea de los suelos de la zona, así como también los nitratos, como consecuencia de una pequeña actividad agrícola, y el *p*H es neutro.

Unos metros por debajo de la mina, sin embargo, el Agrio tiene una conductividad mayor y más cantidad de fosfatos, un *p*H ácido y una reserva alcalina prácticamente nula. Cuando las aguas del Agrio desembocan en el Guadiamar, el *p*H presenta unos valores normales. A partir de esta zona la conductividad y la reserva alcalina en el Guadiamar aumen-

tan fundamentalmente por el efecto de los vertidos de aguas residuales de los pueblos. El Guadiamar, aquí, está extremadamente contaminado con materia orgánica, por vertidos incontrolados de alpechines y aguas residuales.

Tras el vertido, la cantidad de metales en el agua aumentó drásticamente. Las aguas del Agrio registraron concentraciones de cadmio hasta 1000 veces superiores que las del Guadiamar no afectado. Una pauta similar se observó para el cobre y el zinc (400 veces), más de 200 para el níquel, más de 150 para el plomo y más de 20 para el talio y el antimonio. Estas concentraciones se mantuvieron hasta el otoño, para decaer en invierno.

En el Guadiamar, el Zn incrementó su concentración más de 300 veces con respecto a zonas exentas. En general, la contaminación disminuía a medida que se alejaba del punto del vertido. Pero algunos elementos como el As, V, Mo y Cr aumentaban en puntos más distantes de la mina.

Las comunidades planctónicas del río, perifiton y de macroinvertebrados, resultaron muy dañadas. No comenzaron a recuperarse hasta después de un año. Al efecto directo de los metales pesados hay que añadir el efecto de la modificación del hábitat generada por las labores de limpieza y el efecto de otros vertidos a lo largo del Guadiamar (urbanos, alpechines y escorrentía desde zonas agrícolas). Los análisis de metales mostraron que los organismos de los lugares afectados tenían unas concentraciones siempre superiores a las zonas exentas, especialmente en Zn, Cu, Pb y As, y, en menor cantidad, Cd, Tl y Sb.

Tres años después del vertido, la calidad del agua del río, aunque muy variable en el tiempo, debido a los grandes cambios de caudal y a las propias tareas de limpieza, persiste deficiente. Hasta la zona del puente de las Doblas esta situación se debe a la contaminación por metales pesados. Aguas abajo de las Doblas, a partir de Aznalcázar, la baja calidad del agua obedece a otras razones no relacionadas con el vertido tóxico, que también repercuten en el Guadiamar (vertidos ilegales de alpechines y residuos urbanos).

Las concentraciones de metales y arsénico en los sedimentos del lecho fluvial disminuyeron en picado desde noviembre de 1999, coincidiendo con las diferentes relimpiezas. Pero en enero de 2000, todavía las concentraciones en el tramo afectado por el vertido eran superiores a las de los puntos de referencia exentos. El *p*H bajo, las elevadas concentraciones de metales registradas hasta el puente de las Doblas y la desestructuración del río por las sucesivas limpiezas han impedido la recuperación de la comunidad de macroinvertebrados hasta niveles similares a los que se encuentran en las zonas de control no afectadas por el vertido.

Después del proceso de limpieza, se observó una disminución de la concentración de metales en casi todas las especies de macroinvertebrados. Hoy, los ejemplares analizados desde el puente de las Doblas hacia abajo presentan niveles similares a las zonas exentas, mientras que aguas arriba de las Doblas siguen registrándose concentraciones altas de metales.



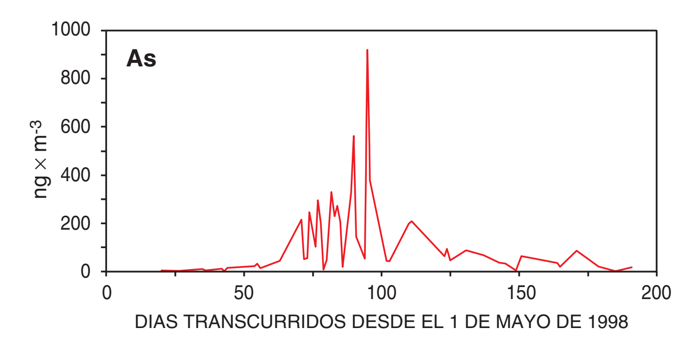
7. NUBES DE POLVO originadas por las labores de limpieza en los meses de julio y agosto.

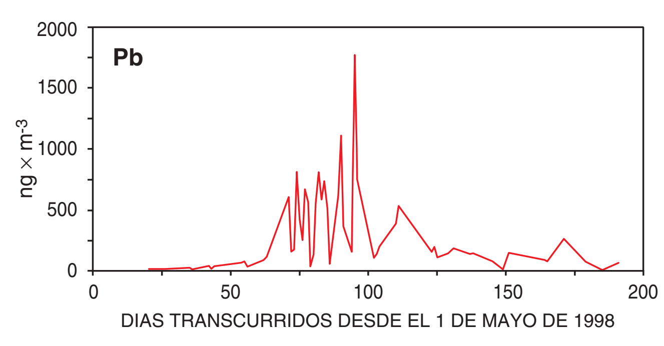
Una de las especies de gran interés comercial en la zona, y que suele ser un excelente indicador ambiental, es el cangrejo de río (*Procambarus clarkii*). Las poblaciones del cauce del Guadiamar desaparecieron tras el vertido. Han venido recuperándose a un ritmo muy lento, no sólo por los efectos de la contaminación, sino también por las modificaciones del hábitat causadas por las sucesivas labores de limpieza. Los individuos capturados en la zona afectada por el vertido presentaban siempre niveles elevados de metales pesados, superiores a los permitidos en la legislación.

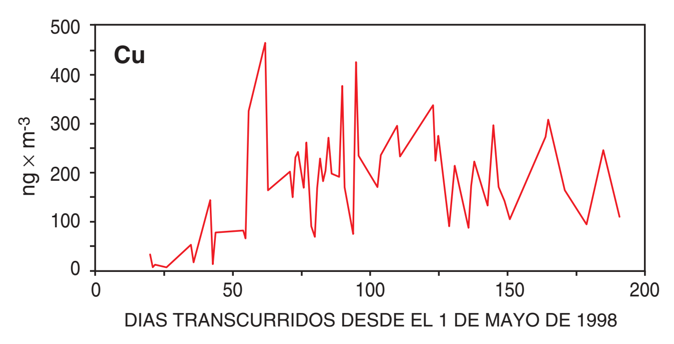
La comunidad de peces del río desapareció en los primeros días del accidente. Hasta seis meses después no se inició el proceso de recolonización, salvo en el Vado del Quema. Esos vertebrados mostraron una capacidad notable para colonizar áreas degradadas, una vez que la calidad del agua había mejorado. Con todo, la diversidad es todavía bastante menor en el área afectada por el vertido tóxico que en las aguas de cabecera. Lo mismo ocurre con la abundancia de individuos, que continúa siendo sustancialmente baja. Pese a la migración observada desde zonas adyacentes y a la ejecución de la segunda fase de limpieza del cauce del río (julio-noviembre 1999), la pérdida de las propiedades físicas del hábitat explica que el movimiento de peces hacia la zona afectada no se halle normalizado.

Estuario del río Guadalquivir

El río Guadalquivir tiene una amplia zona de drenaje (unos 58.000 km^2) y una media de descarga de agua de unos 160 m^3/s. Río caudaloso cuyo estuario bañan mareas semidiurnas de 2,5-3 m. La di-







8. CONTAMINACION ATMOSFERICA. Evolución temporal de los niveles de arsénico, plomo y cobre en partículas totales en suspensión, desde el 20 de mayo al 10 de noviembre de 1998. Nótese el descenso relativo de los niveles de As y Pb respecto a los alcanzados durante la extracción masiva (a partir de julio) de los lodos. Los niveles de noviembre, terminadas las tareas de extracción, triplicaban a los iniciales. El cobre presenta una evolución peculiar debido a aportes diferentes a las partículas de pirita.

námica estuárica hace que los sedimentos se resuspendan, que, junto con el régimen de corrientes, originan un área de gran turbidez. Dada la longitud del curso y la antigüedad y naturaleza de las actividades antrópicas que en él se desarrollan, el estuario del Guadalquivir recibe una importante descarga de elementos contaminantes (cobre y plaguicidas), de naturaleza antrópica. Por culpa de esa contaminación están prohibidos desde hace años la pesca y el consumo del ostión (*Crassostrea angulata*) y otras especies filtradoras.

No es fácil en ese contexto determinar la influencia del vertido de Aznalcóllar. Pero algo se avanzó en el conocimiento de su estado general. Así, se comprobó que en las fases disuelta y particulada del sedimento era el zinc el contaminante principal. El resto de los metales analizados alcanzaban concentraciones variables en función del estado de la marea, pero dentro de los intervalos acostumbrados en sistemas litorales. Un 90 % del Zn se encontraba asociado a las fases más lábiles o biodisponibles, prueba de su incorporación reciente en el sedimento.

Para conocer el efecto del vertido en los organismos del estuario, se eligieron las especies que, por su posición trófica o por su interés comercial, debían considerarse indicadoras. De acuerdo con los resultados obtenidos, los niveles de contaminación del boquerón, sardina, jurel, mojarra, acedía, lenguado, albur, corvina, rape, langostino y pulpo, capturados en la desembocadura, no superaban los límites legales existentes. Los contenidos de arsénico total e inorgánico en dichas especies (excepto el pulpo) eran bajos y exentos de peligro para la salud humana. En el caso del pulpo (*Octopus vulgaris*), si bien se encontraron niveles altos de arsénico total, los valores de arsénico inorgánico fueron bajos, por lo que no representaban ningún riesgo para el consumo. (El arsénico inorgánico es la especie más tóxica de arsénico.)

El estado del langostino (*Melicertus kerathurus*), especie muy ligada al sustrato, no difería apenas del habitual de esta especie en el Mediterráneo. Resultados parecidos se observaron en la cigala (*Nephrops norvegicus*), que vive en agujeros en el fango.

Sin embargo, otras especies muy ligadas al fondo o de hábitos filtradores mostraron valores por encima del límite legal para el cobre (20 ppm): ostión, galera (*Squila mantis*), cajeta (*Calappa granulata*), camarón (*Palaemon longirostris*) y boca (*Uca tangeri*). Esta última especie así como la coquina de fango (*Scrobicularia plana*) presentaron también valores elevados de arsénico inorgánico. En el caso de ingestas masivas de dichos productos se podrían superar las ingestas diarias admisibles propuestas por la FAO/OMS. De todos modos, para que dichas ingestas tuvieran repercusiones sobre la salud humana deberían mantenerse durante períodos elevados de tiempo (5 o 6 años) y de una forma continuada. Otros elementos contaminantes, como el cadmio, aunque altos en el ostión, no sobresalían en el resto de las especies analizadas.

En la actualidad las especies han experimentado un descenso en los niveles de contaminantes, exceptuando algunas que tradicionalmente han mostrado niveles altos (ostión, galera), no asociables al vertido sino a la elevada concentración de metales (Cu) procedentes de explotaciones agrícolas y de los ríos Tinto y Odiel.

Aves

La diversidad de aves constituye una nota distintiva de la zona. Particular interés revestía, a propósito del vertido, el ganso europeo (*Anser anser*), cuya población está formada por casi medio millón de ejemplares. Dentro de esa población se consideran varias subpoblaciones que tienden a invernar en



9. PENETRACION DE CONTAMINANTES en los suelos. El análisis del suelo subyacente a los lodos (0-10 cm) mostró un incremento notable en la concentración de metales de mayo a junio. Durante este corto período la concentración de metales en la superficie del suelo se incrementó de 3 a 15 veces. En la zona del Puente de Pilas, por ejemplo, se registraron los siguientes valores: Cu de 64 a 264 mg/kg, Zn de 600 a 1859 mg/kg, As de 24 a 339 mg/kg, Pb de 98 a 700 mg/kg, Tl de 1 a 5 mg/kg. Aunque el lodo tiene una elevada porosidad capilar y puede almacenar cantidades de agua relativamente elevadas (hasta 4 mm de agua por centímetro de espesor), el riesgo de que los metales presentes en fase soluble pasaran al suelo durante los eventos de lluvia era cada vez más alto, e iría aumentando con el tiempo. La celeridad del proceso de oxidación de los lodos se pone de manifiesto, no sólo por la formación de una costra blanca superficial de sulfatos complejos de diferentes metales, sino también por el incremento del contenido en sulfatos solubles de los lodos. De mayo a junio, los sulfatos solubles se incrementaron de 10 a 20 veces su valor original; en Pilas-Aznalcázar pasaron de 6 a 112 g/L y en el Quema pasaron de 10 a 120 g/L. Este incremento iba acompañado, lógicamente, de una liberación de H^+ que provocó una clara disminución del *p*H.

áreas distintas. La ruta migratoria atlántica engloba las aves que nidifican en el centro de Europa y Escandinavia, y hallan en España y Holanda sus lugares preferentes de invernada. El tamaño de esta población se estima en unos 200.000 individuos. En los últimos treinta años ha crecido el número de individuos y se ha expandido su área de nidificación.

En las marismas del Guadalquivir hibernan un número variable de gansos que, en los años con climatología favorable, alcanza los 80.000 individuos y, en los desfavorables, no supera los 50.000. Las aves comienzan a llegar a Doñana en el mes de octubre; en diciembre y enero se congrega el número máximo. Los últimos gansos abandonan la zona a lo largo de marzo.

El accidente minero supuso una entrada importante de metales pesados y arsénico en áreas visitadas por los gansos. En las Marismas del Guadalquivir suelen éstos alimentarse de bulbos de castañuela (*Scirpus spp.*) y tomar sedimentos y arenilla para facilitar la trituración de los vegetales en la molleja. Los metales parecen concentrarse en altas proporciones en los bulbos de castañuela y en los barros de las zonas de alimentación habituales para los gansos; por ejemplo, el Cerro de Los Ansares. Hasta hace poco hubo allí una gran actividad cinegética, quedando los perdigones de plomo mezclados con la arena; ingeridos por los gansos, son una fuente adicional de contaminación.

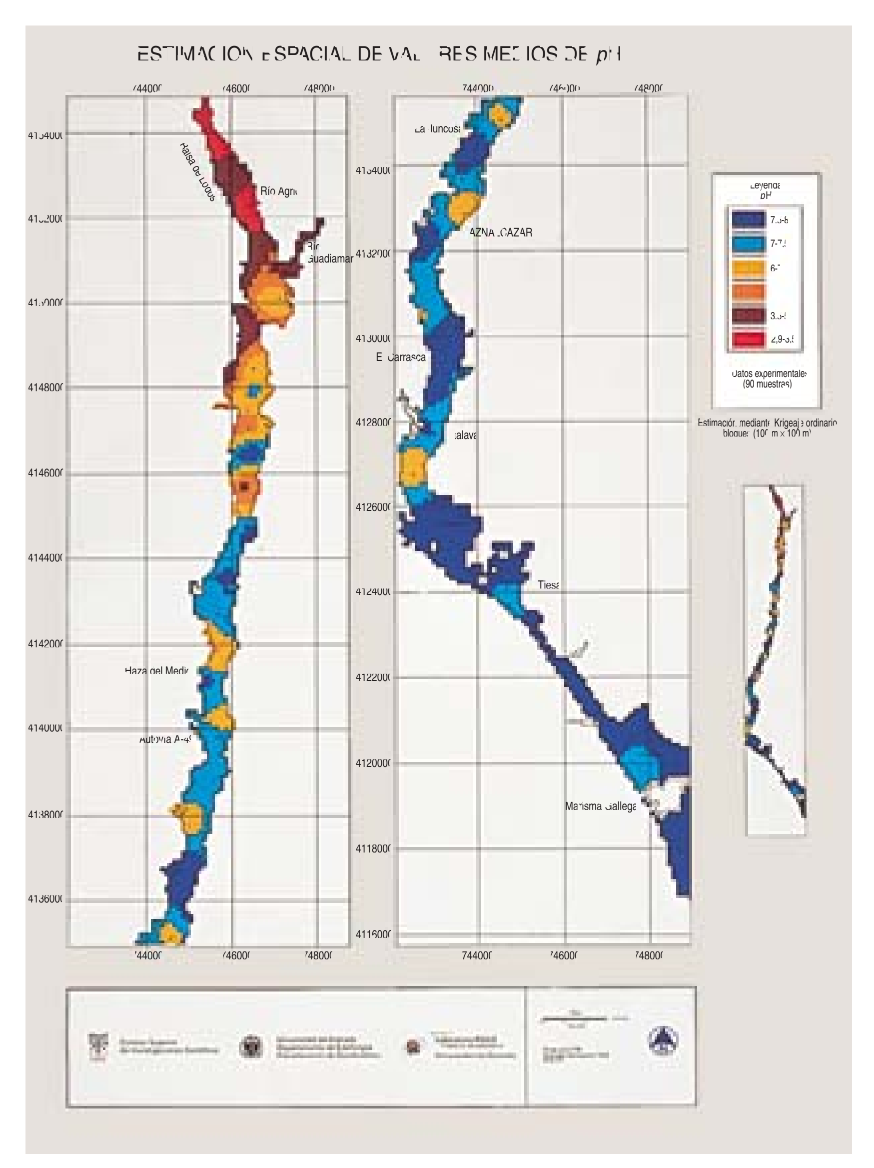
Durante el invierno 1998/99 el número de gansos invernantes en las Marismas del Guadalquivir fue similar a la media de años secos anteriores. Pero la cifra de los que visitaron ese invierno el área contaminada de Entremuros septuplicó la media de los seis años secos anteriores.

Sucedió lo que se temía. La población de gansos invernantes mostró concentraciones de Zn, Pb y Cd suficientes para producir efectos subletales. La concentración de zinc podía atribuirse al vertido; la de plomo podía tener dos fuentes: el vertido y los perdigones. En el período invernante de 1999/2000 la situación cambió a favor. Descendió el nivel de contaminación de los individuos y se redujo la fracción de la población afectada.

No se observó, en el conjunto de especies, un incremento anormal de la mortalidad vinculada a los metales. El ganso común constituyó la única excepción, asociada a la presencia de plomo. En otro orden, durante el período reproductor sólo un 10 % del conjunto de aves acuáticas corrió peligro de verse afectada por la contaminación.

Si en el verano de 1998 subieron los niveles de metales en algunas especies, durante el verano del año siguiente las concentraciones de plomo y cadmio habían descendido de forma notable respecto al último invierno. Sin embargo se mantenían altos para zinc con tendencia a incrementarse y, lo que era más preocupante, el arsénico empezaba a aparecer en ciertas aves con mayor frecuencia que en períodos anteriores. El cobre mantuvo sus niveles del postrer invierno, habiendo desaparecido los valores altos que se detectaron en el verano del 98.

El éxito reproductor del milano negro, milano real y cigüeña blanca no se ha visto alterado. Tampoco ha variado el tamaño final de pollada respecto a otros años de características similares en la garza real, garza imperial y espátula. Desde el punto de vista poblacional, el vertido no ha tenido, pues, consecuencias tangibles. Pero conviene mencionar los



10. DISTRIBUCION DEL *p*H EN LOS SUELOS, una vez terminadas las labores de limpieza en octubre de 1998. Desde el Puente de las Doblas hacia la zona de Entremuros, los valores de *p*H no bajaron de la neutralidad; se registraron cantidades importantes de carbonato cálcico, sales, arcilla y, en general, de todos los factores del suelo que influyen positivamente en su poder neutralizante. Desde Puente de las Doblas hacia Aznalcóllar, se observó una gran heterogeneidad, encontrándose áreas donde el *p*H alcanzaba valores de 7, otras donde éste no sobrepasaba el valor de 5 y otras en que no llegaba a 3. Es decir, existían ambientes hiperácidos, ácidos y neutros. Por otra parte, la textura del suelo es más ligera que en la zona anterior y el contenido en carbonato cálcico es muy bajo o nulo, de forma que no se alcanzan valores superiores al 3 % desde Soberbina hacia arriba.

efectos en una especie singular, la cigüeña blanca (*Ciconia ciconia*). Comparados con individuos control, los ejemplares que habitaban zonas contaminadas sufrieron importantes daños genéticos. Un 5,7 % de los pollos nacidos en la colonia de la Dehesa de Abajo presentaban malformaciones en el pico, curvado hacia arriba. Los análisis descubrieron su relación con la concentración de metales, arsénico sobre todo.

Sólo un 2,6 % de los individuos analizados alcanzan concentraciones de metales en sangre que indiquen intoxicación. Los tres casos corresponden a patos reales (*Anas platyrhynchos*) y el metal implicado es el plomo. Pero algunos análisis apuntan a la posible existencia de una fuente adicional de arsénico en la zona, ligada a labores agrícolas.

Mamíferos

Entre las especies que podían verse más afectadas por el vertido se eligieron la nutria (*Lutra lutra*), el ratón moruno (*Mus spretus*) y el conejo silvestre (*Oryctolagus cuniculus*). La nutria, mustélido de hasta unos nueve kilos de peso, vive más de diez años y consume cada día alrededor de un kilo de peces y crustáceos. Tiene, por tanto, un elevado potencial de bioacumulación de plaguicidas y metales pesados.

Como consecuencia inmediata del vertido y la consiguiente desaparición de presas, la nutria se ausentó del río Guadiamar, al que ha vuelto y recolonizado. Los niveles de metales pesados en las heces de las nutrias que habitan este entorno son mucho más elevados que los medidos previamente en otros lugares.

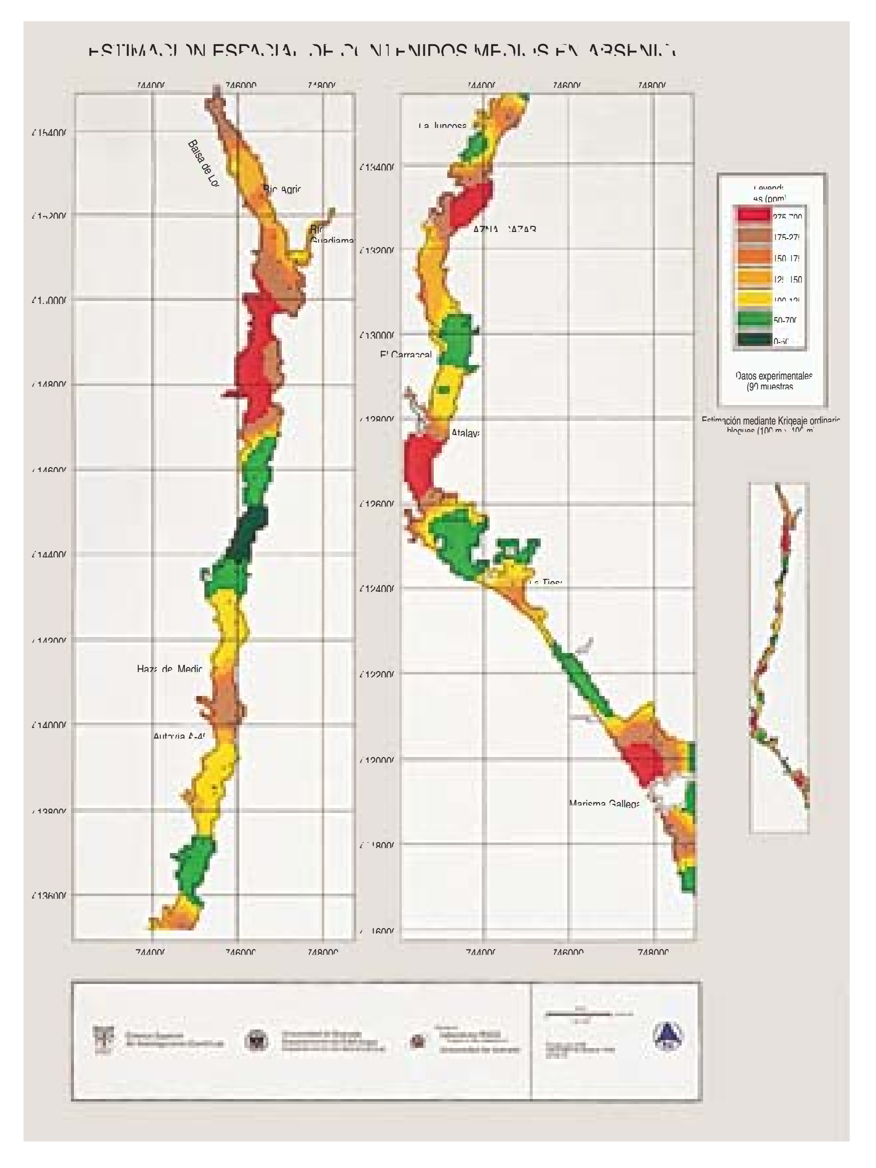
La veracidad del apelativo de "especie centinela" que se le asigna al ratón moruno ha quedado respaldada en distintas investigaciones. Han aflorado correlaciones positivas entre contaminación por metales pesados y daño genético. Antes incluso del desastre, se disponía de información, relativa a los años 1996 y 1997, sobre alteraciones genéticas sufridas por esta especie en diferentes puntos del Parque Nacional de Doñana. El ratón moruno abunda en las marismas del Guadalquivir, carente de protección y expuesto, por tanto, a cualquier eventualidad.

Los ratones capturados junto al Guadiamar mostraron niveles de contaminación parecidos a los del Polo Químico de Huelva, aunque muy superiores a los muestreados dentro de la Reserva Biológica de Doñana. Tras la rotura de la presa, se observaron en ratones capturados en zonas junto al Guadiamar niveles elevados de peroxidasas, aunque similares a los existentes antes de la riada. Sin embargo, los ratones procedentes de tales zonas mostraron valores muy superiores de GSH transferasa citosólica y microsómica a los detectados antes del accidente.

El conejo silvestre desempeña un papel "clave" en los ecosistemas mediterráneos. Constituye un componente importante de la dieta de carnívoros y rapaces, alguno de ellos seriamente amenazados de extinción. Por ello se seleccionó. Había que determinar si se había convertido en transmisor de contaminantes a través de la cadena trófica. Los resultados obtenidos hasta la fecha indican altas actividades de Se-GSH-peroxidasa (antioxidativa).

Las lecciones del accidente

La historia de esta catástrofe ambiental debería hacernos reflexionar y dar los pasos necesarios para evitar que se repitan situaciones como la de Aznalcóllar. Se conocía de antemano la fragilidad de la balsa. Desde hacía tiempo se venían sucediendo denuncias sobre la falta de estabilidad de la presa. Algunos informes realizados por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas a finales de los años setenta y durante los ochenta habían advertido de la contaminación del río Guadiamar y de repetidos episodios que indicaban la presencia de vertidos incontrolados. Tan sólo 8 meses antes del accidente, la Estación Biológica de Doñana volvía a pedir por escrito que se exigiera a la empresa la elaboración de un plan de emergencia ante la eventualidad de una rotura de la balsa, petición que fue de nuevo desestimada.



11. DISTRIBUCION DEL CONTENIDO DE ARSENICO en los suelos una vez concluidas las tareas de limpieza en octubre de 1998. El análisis mostró valores por encima de cualquier normativa existente, no sólo para el arsénico sino también para el talio y el plomo.

La existencia de un plan de emergencia con sus dispositivos e infraestructuras hubiese limitado el daño y el costo de la limpieza y debería ser una obligación normativa para este tipo de balsas, especialmente si aguas abajo se encuentra un lugar del valor ambiental de Doñana. En este sentido, la normativa europea de contaminación en ecosistemas terrestres debería ser revisada tras los accidentes de Doñana y el Danubio.

Al no disponerse de un plan de emergencia, las primeras horas de la catástrofe fueron de enorme incertidumbre, aunque los responsables institucionales reaccionaron con acierto. De entrada, había que limitar la extensión afectada y tratar de confinar el agua contaminada en algún lugar donde su depuración y tratamiento fuera factible. La hora del accidente facilitó que no hubiese pérdidas humanas en una ribera muy transitada como es la del Guadiamar. La fecha de la rotura, al comienzo de la estación seca, permitió disponer de tiempo suficiente para retirar la mayor parte de los lodos antes de la llegada de las lluvias, limitando así la expansión de la contaminación. La creación, por iniciativa del CSIC, de un comité de seguimiento de la catástrofe, que emitió su primer informe tan sólo cuatro días después del accidente, tuvo un papel fundamental tanto en el asesoramiento directo a las administraciones como en la comunicación pública. El accidente ha costado al erario público más de 30.000 millones de pesetas.

Bibliografía complementaria

THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE MINE TAILING ACCIDENT IN AZNALCOLLAR (SOUTH-WEST SPAIN). Dirigido por J. A. Grimalt y E. Macpherson, en *The Science of the Total Environment*, vol. 242, n.º 1-3, pág. 332; 1999.

Ciencia y sociedad

Recursos pesqueros

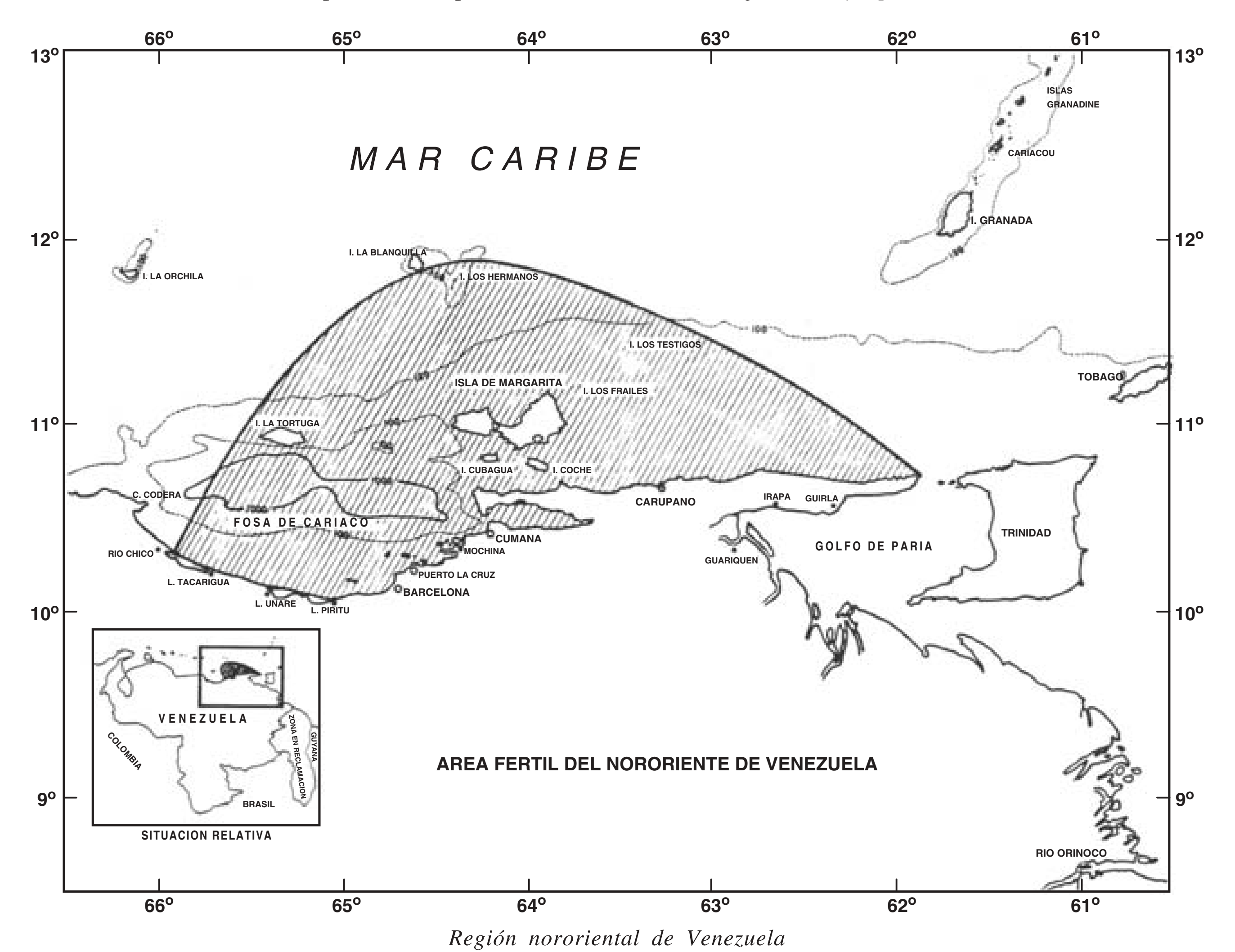
Caribe

El Caribe, con un área de 1.940.000 km^2, es un mar pobre desde el punto de vista pesquero. Según las estadísticas publicadas en 1995 por la FAO, las capturas nominales de los países caribeños sumaron 554.064 Tm, cifra que incluye la pesca de las Antillas y de los países continentales (excepto México) que bordean el Caribe.

La producción marina venezolana fue de 390.411 Tm, equivalentes al 70,46 % del total del Caribe. Por su cuantía, la producción pesquera venezolana constituye una riqueza excepcional. La mayor parte (75 %) se extrae en la región nororiental, en su área marina fértil, que tiene una superficie de sólo 55.000 km^2.

Las aguas enriquecidas se asocian con la surgencia de aguas subsuperficiales que contienen una alta concentración de nutrientes. Además, existen otros factores, como el río Orinoco que aporta materia orgánica, las lagunas costeras, las ondas internas y la presencia de islas, que también propician la fertilidad marina regional.

Moluscos. Al grupo de los bivalvos pertenecen las especies de mayor importancia comercial de la república. En 1995 se extrajeron 33.987 Tm de *Arca zebra*, destinadas a la industria conservera. La ostra *Pinctada imbricata* se explotó desde tiempos precolombinos hasta 1960 con el fin de obtener perlas; ahora se comercializa su carne. En ambos casos se faena con redes de arrastre sobre fondos con profundidad inferior a los 30 m. El ostión *Crassostrea rhizophorae* vive sobre raíces del mangle rojo en las lagunas litorales. El mejillón *Perna perna*, hoy abandonado, se cultivó con éxito hasta 1990 en balsas flotantes. El guacuco *Tivela mactroides* y el chipichipi *Donax denticulatus* viven enterrados en playas arenosas. Medran varias especies de vieiras; para *Euvola ziczac* y *Lyropecten nodosus*, de excelente



Región nororiental de Venezuela

PAIS	PESCA-TM	%	PAIS	PESCA-TM	%
Venezuela	390.411	70,46	Granada	1486	0,27
Cuba	50.342	9,08	Turk-Caicos	1400	0,26
Colombia	22.771	4,11	St. Vicent	1320	0,24
Rep. Dominicana	16.153	2,91	St. Lucia	1022	0,18
Trinidad-Tobago	13.000	2,35	Antillas Holandesas	1010	0,18
Jamaica	9847	1,77	Dominica	838	0,16
Guadalupe	9500	1,71	Antigua	470	0,08
Honduras	6686	1,21	Costa Rica	426	0,07
Nicaragua	5957	1,08	Guatemala	390	0,07
Martinica	5307	0,96	Anguilla	350	0,06
Haití	5000	0,90	St. Kitts	220	0,04
Barbados	3284	0,59	Monserrat	175	0,03
Puerto Rico	2516	0,45	Aruba	130	0,02
Belice	1931	0,35	Islas Caimán	112	0,02
Puerto Rico	1920	0,34	TOTAL CARIBE	554.064	

calidad, y *Amusium papyraceum* se emplea la pesca de arrastre. De los gasterópodos las especies comerciales son *Strombus gigas*, actualmente en veda total, y *Strombus pugilis*, que abunda hasta los 15 m de profundidad. De los cefalópodos, el calamar *Doryteuthis plei* y otras especies, así como el pulpo *Octopus vulgaris*, son comunes en las capturas de la flota de arrastre camaronera.

Crustáceos. Por su importancia comercial destacan los camarones, las langostas y los cangrejos. La flota industrial de arrastre obtiene sus mejores cifras en la pesca del camarón *Farfantepenaeus brasiliensis*. La mayoría de las langostas *Panulirus argus* se capturan en el archipiélago de Los Roques, utilizando nasas. En el oriente del país los cangrejos de los géneros *Callinectes* y *Portunus* tienen gran aceptación y mantienen una pesca que abastece el mercado local.

Equinodermos. Los erizos *Lytechinus variegatus* y *Echinometra lucunter* se explotan artesanalmente; a los pepinos de mar *Isostichopus badoniatus* y *Holothuria mexicana* se permitió extracción oficial durante pocos años.

Peces. De la familia Clupeidae la sardina *Sardinella aurita* constituye, por el volumen de captura, la especie más importante del país. Se extrae para enlatarla y para la elaboración de harina. Los pescadores artesanales utilizan redes playeras (cercos sardineros) donde se mantiene viva la sardina hasta el momento de transportarla a las fábricas enlatadoras. En 1999 la captura de sardina superó las 200.000 Tm.

En el oriente venezolano las especies de interés comercial son peces pelágicos de superficie que forman cardúmenes y tienen hábitos alimenticios ictiófagos, por lo que interactúan con el recurso sardinero. De la familia Scombridae se capturaron 11.577 Tm en 1995 e incluye los carites y sierras (*Scomberomorus brasiliensis*, *S. cavalla*, *S. regalis*), el peto (*Acanthocybium solandri*), las cabañas y carachanas (*Auxis thazard*; *Sarda sarda* y *Euthynnus alleteratus*), el bonito (*Katsuwonus pelamis*), la cachorreta (*Scomber japonicus*) y los atunes (albacora *Thunnus alalunga*; aleta amarilla *T. albacares*; aleta negra *T. atlanticus* y ojo gordo *T. obesus*).

De la familia Carangidae, la siguiente en volumen de captura, sobresalen el jurel y el ojo gordo (*Caranx hippos* y *C. latus*), la palometa (*Alectis ciliaris*), el cataco (*Selar crumenophthalmus*), los pámpanos (*Trachinotus* spp.) y la lamparosa (*Selene setapinnis*).

Los peces de pico se reúnen en Istiophoridae y Xiphiidae. Son apreciados el pez vela (*Istiophorus albicans*), las agujas (azul *Makaira nigricans* y blanca *Tetrapturus albidus*) y el pez espada *Xiphias gladius*. Otros peces depredadores son el dorado *Coryphaena hippurus* (Coryphaenidae), las barracudas *Sphyraena* spp. (Sphyraenidae), el tajal *Trichiurus lepturus* (Trichiuridae), las catalanas *Priacanthus* sp. (Priacanthidae), la anchova *Pomatomus saltatrix* (Pomatomidae), el róbalo *Centropomus undecimalis* (Centropomidae), el sábalo *Tarpon atlanticus* (Megalopidae) y los pargos (Lutjanidae).

El volumen de captura de los peces mencionados y otros grupos depredadores (tiburones y cefalópodos) asciende a más de 40.000 Tm. Pero la deficiencia en las estadísticas pesqueras inducen a suponer que la captura real sea el doble de la mencionada oficialmente y alcance las 80.000 Tm de peces ictiófagos.

En Venezuela la entidad oficial que regula la pesca considera que la industrialización de la pesquería de sardina tiene potencial de expansión (un millón de toneladas). Sin embargo, se olvida que desde el punto de vista biológico esa cifra incluye el alimento de los depredadores naturales, que al igual que la sardina forman parte del ecosistema. De permitirse extraer tal cantidad de sardina, el ecosistema pelágico podría hundirse al romperse la trama trófica.

Los organismos depredadores son canales por los cuales deriva la energía que suministra la sardina como un recurso único en el Caribe y exclusivo del nororiente de Venezuela, por sus condiciones fértiles presentes en un área marina limitada.

ALFREDO GÓMEZ GASPAR
Museo Marino de Margarita
(Boca del Río)
Isla de Margarita,
Venezuela

Neurodegeneración

Modelos animales

Las patologías neurodegenerativas despiertan justificado interés. La enfermedad de Alzheimer y la de Parkinson afectan a un número creciente de personas en un mundo desarrollado que envejece. Enfrentarse a ellas se ha convertido en un tema social prioritario. Pero queda mucho por conocer sobre los mecanismos subyacentes bajo esos azotes modernos. Mientras ese momento llega, sólo cabe recurrir a terapias paliativas.

Para entender cómo operan estas enfermedades podemos partir de un dato: muchas presentan formas hereditarias (tempranas). Si descubrimos qué procesos llevan en tales casos a la degeneración, podremos comprender las bases subyacentes bajo tales patologías. Si conocemos los genes alterados en esas formas hereditarias podemos emprender ensayos con animales transgénicos que reproduzcan con cierta fidelidad el fenotipo enfermo de humanos. Estos modelos animales nos permiten caracterizar genética y molecularmente los mecanismos desencadenantes de la neurodegeneración.

Hay un primer grupo de enfermedades que tienen causas enteramente genéticas. Desde un punto de vista molecular, se caracterizan por la acumulación de repeticiones consecutivas de tres pares de bases (un triplete) en diferentes genes, cuya función "normal" se ignora y cuya expresión es ubicua. Podemos separarlas en dos grupos: enfermedades en las que el triplete se expande dentro de una región codificante (corea de Huntington y muchas ataxias espinocerebelosas) y enfermedades en las que se repite en una región que no codifica para una proteína (distrofia muscular).

Las primeras se caracterizan por la repetición del triplete CAG, lo que se traduce en la repetición consecutiva del aminoácido glutamina en la proteína. Cuanto mayor es el dominio poliglutamínico, tanto mayor agresividad encierra la enfermedad. Dada la inestabilidad genética del dominio, éste se va extendiendo con el paso de las generaciones y la enfermedad aparece a una edad más temprana y en formas más severas.

El dominio poliglutamínico confiere a la proteína propiedades tóxicas. La proteína mutada forma agregados nucleares que se presumen directamente implicados en la patología. Sin embargo, aunque en todas estas enfermedades aparecen dominios poliglutamínicos, sus síntomas son diferentes y las neuronas que degeneran no son siempre las mismas. De ello se infiere que no podemos achacar el fenotipo entero a su presencia.

Los agregados nucleares se dan sólo en ciertas neuronas. Esta especificidad puede deberse a que su toxicidad depende de la interacción entre aquéllos y otras proteínas exclusivas de las células afectadas. La expresión en *Drosophila* de algunas de estas proteínas mutadas, como la huntingtina o la ataxina 1, ha permitido encontrar diferentes grupos de genes que actúan sobre proteínas poliglutaminadas. Algunos genes de éstos son parte de la vía que usa la célula para deshacerse de las proteínas inútiles, la vía de la ubiquitina-proteosoma. Otros están implicados en la detoxificación subsiguiente al estrés oxidativo (procesos muy relacionados con el envejecimiento celular), en la regulación de la transcripción, en el procesado del ARN o en la circulación entre el núcleo y el citoplasma.

Con todo, el éxito principal de tales ensayos con la mosca de la fruta estriba en la demostración de

MUTACIONES MAS FRECUENTES ASOCIADAS A ENFERMEDADES NEURODEGENERATIVAS

ENFERMEDAD	PRODUCTO DEL GEN	LOCALIZACION DE LA PROTEINA	REGIONES DEL CEREBRO MAS AFECTADAS
HUNTINGTON	Huntingtina	Citoplasmática	Estriado y córtex cerebral
ATAXIA ESPINOCEREBELOSA-1	Ataxina-1	Nuclear en neuronas	Células de Purkinje, núcleo dentado
ATAXIA ESPINOCEREBELOSA-2	Ataxina-2	Citoplasmática	Células de Purkinje, lóbulos frontotemporales
ATAXIA ESPINOCEREBELOSA-3	Ataxina-3	Citoplasmática	Ganglio basal, médula espinal
ATAXIA ESPINOCEREBELOSA-7	Ataxina-7	Nuclear	Cerebelo, córtex cerebral, córtex visual
ATROFIA MUSCULAR ESPINOBULBAR	Receptor de andrógeno	Nuclear y citoplasmática	Raíces de los ganglios dorsales, neuronas del bulbo
ALZHEIMER	App Presenilinas Apolipoproteína-E4	Depósitos extracelulares de Aβ (fragmento de App)	Córtex cerebral (hipocampo)
PARKINSON	α-sinucleína Parkinina	Depósitos citoplasmáticos (cuerpos de Lewy)	Sustancia negra, estriado

la validez de los modelos animales para definir los procesos involucrados en la neurodegeneración e identificar posibles dianas terapéuticas.

Mayores dificultades entraña el estudio de otras enfermedades más frecuentes (Alzheimer y Parkinson) porque su aparición depende de muchos factores, no solamente genéticos. Los animales transgénicos no reproducen con la fidelidad necesaria la enfermedad. Incluso en las formas heredadas se da una heterogeneidad genética que nos impide centrarnos en un solo gen. Y de entre las distintas modificaciones que experimenta la célula, cuyo desenlace termina en la muerte de las neuronas, no podemos identificar cuál sea la causa determinante y cuáles meros efectos derivados.

ENRIQUE TURIÉGANO
y JONATHAN BENITO
Depto. de Biología
Universidad Autónoma de Madrid

Mundo animal

Parasitofauna de la gaviota de Audouin

La gaviota de Audouin (*Larus audouinii*), especie endémica del área mediterránea durante su estación reproductora, tiene en España las colonias de cría más importantes del mundo, ubicadas principalmente en el delta del Ebro, las islas Chafarinas, las Baleares y otras islas e islotes de menor importancia. De hecho, las colonias españolas albergaron, en el año 1994, cerca del 94 % de las parejas nidificantes.

Conocer, entre otros aspectos de su biología, la parasitofauna, reviste sumo interés desde el punto de vista de su ecología parasitaria y desde la perspectiva de los aspectos higiénico-sanitarios que deben tenerse en cuenta para la conservación de sus poblaciones.

En el curso del estudio de la fauna parásita de la gaviota de Audouin en las islas Chafarinas se han identificado 14 especies de endoparásitos (helmintos) y cuatro especies de ectoparásitos. Los endoparásitos se instalan, de preferencia, en uno de los siguientes órganos: esófago, molleja, intestino, conductos pancreáticos, vesícula biliar, riñón y vasos sanguíneos. Se han encontrado diez especies de gusanos planos foliáceos (trematodos digénidos, entre ellas una nueva, *Acanthotrema armata*), dos de tenias y otras dos de gusanos redondos (nematodos).



Acanthotrema armata*, una nueva especie de digénido detectada como parásito de la gaviota de Audouin. (Ejemplar adulto y grávido en visión ventral.)*

La comunidad de parásitos intestinales de la gaviota de Audouin no difiere apenas de las comunidades detectadas en otras gaviotas. Las variaciones en abundancia y diversidad de especies parásitas parecen resultar de los hábitos alimentarios, pues todos sus parásitos intestinales se transmiten a través de la ingesta.

La gaviota de Audouin, piscívora, se alimenta sobre todo de clupeidos (*Sardina pilchardus*, *Sardinella aurita*), razón por la cual sufre una menor presencia de helmintos que otras. Sardinas y percas son los hospedadores intermediarios habituales en los ciclos vitales de los digénidos y los nematodos parásitos de *Larus audouinii*.

De acuerdo con los datos disponibles, no parece que los endoparásitos representen peligro potencial alguno para las poblaciones de gaviotas de las islas Chafarinas. La ausencia de helmintos con ciclos vitales directos (sin intervención de hospedadores intermediarios) hace pensar que, aunque se produce una superpoblación de gaviotas en época de cría, no aumentan las posibilidades de infección, pues ésta va ligada a la alimentación.

Una especie de garrapata y tres especies de "piojos masticadores" ectoparasitan nuestra gaviota. El movimiento de los ectoparásitos sobre las plumas produce una irritación intensa y las aves pueden dañarse ellas mismas por un exceso de rascado.

Los piojos no suponen un grave problema sanitario. De las garrapatas, en cambio, no podemos decir lo mismo. Al vivir en los nidos y sus alrededores, atacan a jóvenes no volantones y a adultos en época de cría. La patogenicidad por ellas inducida adquiere niveles peligrosos con la combinación de varios efectos en aves hiperinfestadas: tóxico (inoculación de anticoagulantes y otras sustancias tóxicas), traumático (la irritación, inflamación y posible edema producidos por la propia picadura), expoliador (debido a la sustracción de sangre por parte de un gran número de parásitos) e inoculador (vector de patógenos como virus, bacterias, protozoos u otros metazoos parásitos).

Una gran cantidad de garrapatas alrededor de los nidos puede, también, provocar la deserción de los nidos. En el caso de la gaviota de Audouin, la escasa cantidad de garrapatas encontradas por nido (media de 7,2 y un máximo de 49), la ausencia de jóvenes hiperinfestados y la ausencia de deserciones de nidos nos permite predecir que estas garrapatas no tienen gran significación patogénica sobre la población de *L. audouinii*.

VICENTE ROCA
y MARIO LAFUENTE
Departamento de Biología
Animal (Parasitología Animal)
Universidad de Valencia

Secretos lunares

Detección de destellos colisionales

La Luna carece de una atmósfera densa. El material interplanetario que la bombardea de forma incesante, alcanza su superficie sin ser frenado apenas. Por esta razón, las colisiones de cuerpos in-

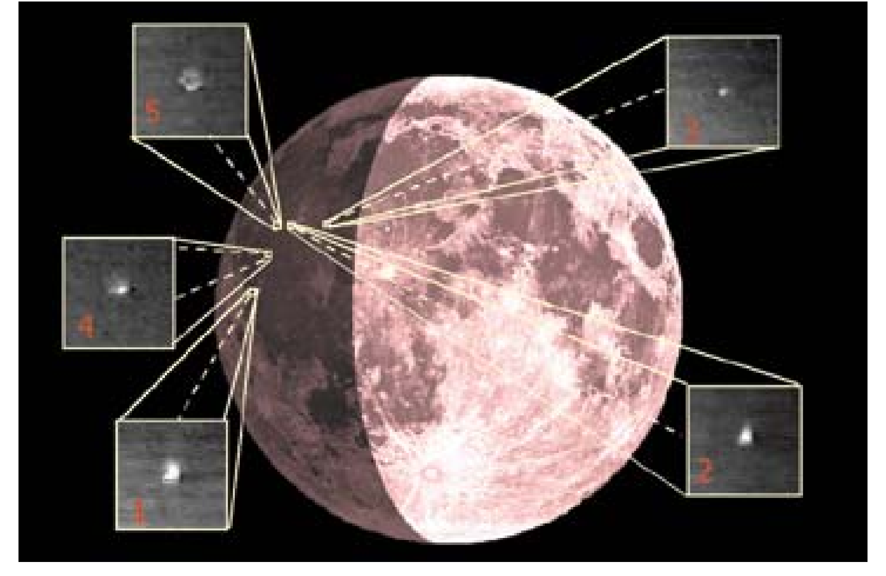
terplanetarios adquieren en nuestro satélite una violencia mucho mayor que en la Tierra. Cuando la masa del objeto que golpea la superficie lunar es suficientemente alta, se abren cráteres característicos.

Los proyectiles interplanetarios, o "meteoroides", están constituidos por material de variada naturaleza, desde pequeños granos de silicatos y otros compuestos hasta fragmentos de asteroides y cometas, que pueden incluir hielos de diversas sustancias. Muchos de estos meteoroides, bastante más volátiles de lo que suele creerse, generan cráteres en la Luna.

En la Tierra, nuestra atmósfera hace que la mayoría de los meteoroides que colisionan con ella, vayan perdiendo energía de forma gradual; o se desintegren sin alcanzar el suelo, a no ser que tengan un tamaño muy grande (o un tamaño no tan grande y una composición rica en materiales refractarios, que les impida vaporizarse a pesar de las temperaturas elevadas de la entrada). Si al efecto de la atmósfera añadimos los efectos de la erosión y la orogenia terrestres, entenderemos por qué que nuestro planeta apenas presenta cráteres de impacto.

Durante los violentos procesos de las colisiones lunares no sólo se abren cráteres. Los meteoroides que golpean se vaporizan en su integridad (junto con parte de la superficie lunar); el gas ionizado que resulta en un proceso colisional típico, se expande rápidamente por su elevada temperatura, emitiendo un destello de luz en esa fase.

Aunque los principios teóricos del fenómeno se conocían desde tiempo atrás, no se había observado. Los primeros destellos producidos por impactos lunares fueron al fin detectados, sin ambigüedad, el 18 de noviembre de 1999. Con anterioridad a esa fecha, los sismógrafos instalados en la Luna durante los programas de exploración habían mostrado señales que se debían casi con toda certeza a colisiones de meteoroides en la Luna, pero no se contaba con ningún registro óptico. Algunas notas históricas hablan de destellos en la Luna vistos con y sin telescopios, que, de ser ciertos, podrían haberse debido a impactos en la Luna, pero no hay prueba de ello. Frederick W. Herschel pudo haber observado algún fenómeno de este tipo.



Fotocomposición en la que se muestran, ampliados, algunos de los destellos que fueron captados en la Luna, el 18 de noviembre de 1999. El orden en que ocurrieron está marcado por el número en rojo dentro de cada ampliación. La figura también muestra, de forma aproximada, la zona donde ocurrieron las colisiones. Nótese que, aunque la fase de la Luna en la imagen es la correspondiente al 18 de noviembre de 1999, el brillo de la parte nocturna se ha aumentado en esta fotocomposición artificial

Con aproximadamente un año de antelación a noviembre de 1999, nuestro grupo del Instituto de Astrofísica de Andalucía había previsto y anunciado que los impactos de algunos fragmentos pequeños del cometa 55P/Tempel-Tuttle producirían destellos suficientemente brillantes como para poder detectarlos en la parte nocturna de la Luna que mira hacia la Tierra. (Los destellos que se produjeran en la parte iluminada del satélite no serían visibles porque se difuminarían en el intenso brillo lunar.)

El 18 de noviembre de 1999 se daban las circunstancias propicias para ello, no sólo por la adecuada orientación de la Tierra y la Luna, sino también porque sabíamos que el flujo de fragmentos del cometa iba a ser excepcionalmente alto en ese año. Estos fragmentos, que en la Tierra producen la lluvia de meteoros denominada "Leónidas", chocaron a la velocidad de 72 km por segundo y muy posiblemente abrieron cráteres lunares cuyo tamaño se puede estimar entre 5 y 50 metros de diámetro.

La detección no admitía dudas y resultó relativamente fácil de realizar, ya que se usaron telescopios de pequeño diámetro para lo que son los estándares astronómicos de hoy día (en los que un diámetro de un metro ya se considera pequeño) y se emplearon detectores con acoplamiento de carga normales.

Quizá tan importante como la primera detección sea el haber podido determinar la eficiencia de los procesos colisionales en la emisión de energía en forma de radiación visible. Tal rendimiento permite que la búsqueda de destellos lunares pueda hacerse de modo rutinario para detectar choques de meteoroides esporádicos y de algunas corrientes de meteoroides asociadas a cometas. De esta forma, se podría estudiar la cantidad de meteoroides en función de su masa, lo que reviste sumo interés, por ejemplo, para entender los mecanismos de eyección de materia en los cometas.

Por otro lado, este tipo de trabajos abre las puertas al estudio de aspectos complejos de la física de los impactos a alta velocidad, que no pueden reproducirse en ningún laboratorio terrestre. También nos darán información, en un futuro, sobre la composición de los objetos que golpean y sobre las características de las superficies, no sólo en la Luna, sino también en otros cuerpos sin atmósfera del sistema solar.

JOSÉ LUIS ORTIZ MORENO
Instituto de Astrofísica
de Andalucía, CSIC

Texto y fotos: Sergio Rossi

Marea alta, marea baja

Las mareas, fenómeno habitual en los litorales, constituyen una importante fuente de energía para los organismos que viven en la franja intermareal. El vaivén diario de las masas de agua aporta gran cantidad de alimento a través de corrientes que permiten el reciclado de nutrientes y la resuspensión de materia, aprovechada por los seres vivos. Por ese motivo, muchos vegetales y animales medran entre las duras condiciones de la marea baja y las ventajosas condiciones de la marea alta.

¿Inconvenientes? Entre otros, los embates de las olas, las altas temperaturas, la desecación, los cambios bruscos de alcalinidad y de salinidad o la prolongada exposición a los rayos ultravioletas. ¿Ventajas? Con la marea alta (tras resistir los organismos una dura fase intermareal de fuertes corrientes y oleaje) llegan los nutrientes, las algas microscópicas, detritus en suspensión y zooplancton, lo que propicia una alimentación a pulsos muy abundante.

Pero hay también animales que se han adaptado a aprovechar la desprotección que los organismos sésiles sufren en la marea baja. Así, estrellas de mar, erizos y ostreros, entre otros, depredan en los substratos rocosos, mientras que limícolas, cangrejos y aves lo hacen en los substratos arenosos. Un equilibrio difícil, entre las ventajas y desventajas ofrecidas por el ambiente. Sin embargo, eso no ha impedido que se acumulen importantes biomasas en las franjas litorales intermareales, a pesar de las dificultades que comporta vivir allí.



1. Paisaje en marea baja de sustrato arenoso (Millport, Escocia). Obsérvense los hoyuelos en la arena, abiertos por moluscos bivalvos y gusanos poliquetos



2. Con la marea alta, la abundancia. Sifones de bivalvo (Nuttallia nuttallii) *aprovechan las corrientes de marea para alimentarse*



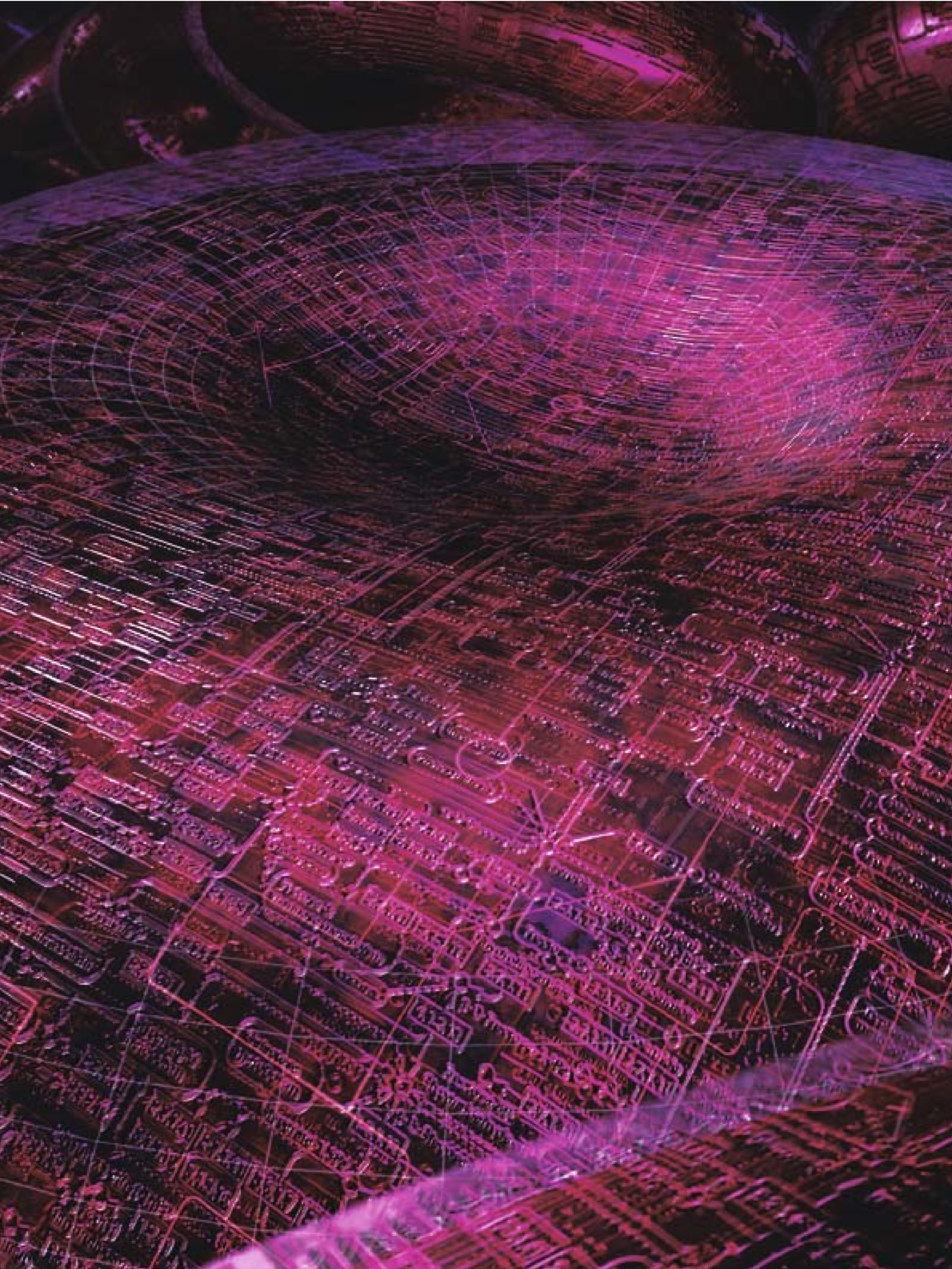
3. En marea alta las algas (como este ejemplar de Ascophyllum nodosum *de aguas escocesas) se han adaptado a flotar mediante "boyas" para exponer una gran cantidad de su superficie y así captar nutrientes del agua*



4. Para los depredadores adaptados, la marea baja puede significar un festín. Estas estrellas de mar (del género Pisaster sp.*) comen mejillones que forman grupos compactos en la zona intermareal*



5. Algas-palmera (Poltesia palmaeformis) *es una de las pocas algas que puede resistir el duro embate de las olas en las zonas más expuestas de la costa norte de California*



CELULAS CIBERNETICAS

La célula más sencilla alcanza tal complejidad que difícilmente los modelos informáticos podrán simular su comportamiento cabal. Con todo, algunos sacudirán los cimientos de la biología

W. Wayt Gibbs

Tres siglos de biología reduccionista han culminado en un triunfo resonante. En su disección de la vida en componentes cada vez menores —los organismos en órganos, los tejidos en células, los cromosomas en ADN y el ADN en genes—, la ciencia ha llegado al límite. Se conoce cada peldaño molecular de la escalera química que constituye la mayor parte del genoma humano. Antes incluso de que el borrador de la secuencia se hiciese público el mes de febrero del año en curso, algunos investigadores con inclinaciones filosóficas estaban ya avizorando el nuevo horizonte de la biología: la era del integracionismo. Nadie cuestiona que los modelos de ordenador serán las herramientas principales con que se insertarán todas las piezas bioquímicas hasta completar una teoría cabal. Pero si la diversidad de "células virtuales" que se están elaborando nos sirve de orientación, parece palmario que no existe acuerdo todavía en torno al uso más idóneo de esas herramientas.

1. LOS GLOBULOS ROJOS fueron las primeras células humanas de las que se hicieron modelos informáticos.

"Se supone que éste es el paso final", observa Drew Endy, del Instituto de Ciencias Moleculares de la Universidad de California en Berkeley. "Tenemos completa la lista de las piezas de un ser humano. Diríase que se trata sólo de juntarlas en un ordenador y apretar un botón" para que se desentrañen los intrincados misterios de la medicina. Pero lo cierto es que "nada podría estar más lejos de la verdad".

Endy habla con pleno conocimiento de causa. Con John Yin, de la Universidad de Wisconsin en Madison, inició en 1994 la programación de un modelo informático que debía incorporar en lo posible cuanto se sabía sobre el mecanismo de acción del bacteriófago T7, virus que infecta la enterobacteria *Escherichia coli*. El virus presenta una morfología característica. Con apéndices que semejan mandíbulas se agarra a la pared exterior de la bacteria e introduce su ADN en ésta. El material genético vírico secuestra el aparato reproductor de la célula y le obliga a producir clones del bacteriófago hasta que la bacteria revienta.

El modelo de Endy y Yin simulaba matemáticamente la traducción de los 56 genes del virus en 59 proteínas, la apropiación de la célula huésped por éstas e incluso la resistencia adquirida por los virus a varios fármacos fundados en el ARN. Parece impresionante. Pero si nos adentramos en las ecuaciones, comenta Endy, veremos que, pese a incluir las mediciones realizadas a lo largo de quince años de experimentos, sigue habiendo un número enorme de grados de libertad. Se pueden inclinar las ecuaciones a un lado u otro de manera que salga cualquier comportamiento. Si un modelo útil ha de sugerir una hipótesis que fuerce a su constructor a preparar un experimento, el de Endy y Yin no lo logró.

Los primeros intentos de crear la vida en el silicio adolecieron, en muchos casos, del mismo problema. Por eso abundan los biólogos para quienes los ordenadores no son más que recipientes del chorro de datos que brota de sus secuenciadores robóticos y analizadores informáticos de genes. Los "modelos" que publican en sus artículos académicos son esquematizaciones rudimentarias basadas en el dogma central, teoría que afirma que un gen del ADN se transcribe en ARN que, a su vez, se traduce en una proteína que realiza una función bioquímica concreta.

Pero en los últimos años ha venido cobrando fuerza, entre los biomatemáticos, un movimiento que pone en entredicho la linearidad simplista del dogma central y que se vale de la simulación con ordenadores para buscar una teoría más potente. "Estamos asistiendo a una revolución kuhniana en biología", declara Bernhard Ø. Palsson, que dirige el grupo de investigación de circuitos genéticos de la Universidad de California en San Diego. Hace dos años fundó con otros Genomatica, empresa dedicada a la confección de modelos informáticos de las células que eviten los errores que hacen del desarrollo de un fármaco un proceso costoso y lento.

La verdad es que, señala John E. Bailey, del Instituto Federal de Tecnología de Zurich, "el coste de la invención de nuevos fármacos está subiendo", pese a los miles de millones de dólares invertidos en anticuerpos monoclonales, clonación, química combinatoria y robótica. Una razón de que estas técnicas no hayan dado el resultado esperado, agrega, estriba en que "se basaban en la idea ingenua de que, para reorientar una célula en determinado sentido, basta con aplicarle un fármaco que inhiba una sola proteína". Según el dogma central, lo normal sería que así fuera, pero nueve de cada diez veces ese principio no funciona.

Los genéticos han creado cientos de cepas *knockout* de bacterias y ratones que tienen bloqueado un gen determinado. Y sin embargo, no parece que en muchos de esos mutantes tal modificación cause anormalidad alguna. Tampoco explica el dogma central, que se vea, por qué con sólo unos 30.000 genes se genera el complejo comportamiento de las miríadas de distintos tipos de células humanas.

"Podría dibujar un mapa de todos los componentes de una célula y poner todas las flechas que hagan falta con sus conexiones", expone Alfred G. Gilman, bioquímico del hospital clínico, de la Universidad de Texas en Dallas, premio Nobel. Pero ni siquiera con los microorganismos unicelulares más sencillos "ni yo ni nadie podríamos predecir ni lo más mínimo mirando ese mapa".

Bailey compara el confuso estado de la microbiología con el de la astronomía en el siglo XVI. "Los astrónomos tenían grandes archivos donde se registraban los movimientos y posiciones muy detallados de los cuerpos celestes", dice, "pero no podían predecir con exactitud los movimientos planetarios. Jamás habrían creído que las órbitas eran elípticas y las describía una ecuación sencilla. Sin embargo, Kepler demostró que era así. Ahora bien, con esto no quiero

Resumen / Células virtuales

- Los biólogos han secuenciado los genomas de muchos microorganismos, entre ellos algunos agentes de patologías humanas, pero no pueden todavía predecir cómo reaccionarán esas células a los fármacos o a estímulos externos.
- Los microbiólogos simulan la bioquímica de las células con modelos informáticos. Algunos se proponen construir modelos que calculen todas las reacciones importantes que se producen dentro de una bacteria. Otros se inclinan por un enfoque propio de la ingeniería; para determinar el comportamiento de la célula establecen las leyes básicas químicas, físicas y biológicas que deben obedecer.
- Se trata, en definitiva, de hallar una forma de realizar experimentos virtuales que aceleren el descubrimiento de nuevos tratamientos médicos y reduzcan su coste. Varias empresas están ya ofreciendo estos servicios, pero la precisión de sus modelos no ha sido verificada mediante una revisión científica por pares.

decir que haya una ecuación sencilla para la biología celular, pero sí que deberíamos buscar unos principios unificadores que ordenen los hechos que tenemos y aporten algún grado de comprensión.”

Uno de los primeros principios de esa naturaleza que podrían salir de las simulaciones celulares en construcción es el de robustez. La vida, sea del tipo que sea, ha de vérselas con alteraciones violentas de la temperatura, cambios en el suministro de alimentos, envites de sustancias tóxicas y ataques que vienen de dentro y de fuera. Para sobrevivir y prosperar las células han de contar con sistemas de reserva y redes biológicas que toleren las interferencias.

Masaru Tomita vio que esas propiedades se iban conformando en los experimentos virtuales que ejecutaba con su modelo “E-Cell”. Con unos compañeros de equipo del Laboratorio de Bioinformática de la Universidad de Keio en Fujisawa, Tomita construyó una célula virtual de 127 genes, en su mayor parte tomados del *Mycoplasma genitalium*, microorganismo unicelular que tiene el menor genoma que se haya descubierto por ahora en una forma de vida que se reproduzca por sí sola. El grupo de Tomita se propone encontrar el número mínimo de genes necesario para crear un organismo autosuficiente y luego sintetizarlo (una estrategia eminentemente reduccionista). Pero Tomita se quedó sorprendido cuando cambió en varios órdenes de magnitud la intensidad con que se expresaban varios genes del modelo: el comportamiento de E-Cell apenas se modificó.

“También para nosotros fue un descubrimiento interesante”, comenta Jeff K. Trimmer, biólogo de Entelos, empresa radicada en la californiana Menlo Park que ha construido un modelo funcional de adipocito humano, así como modelos del cuerpo entero que intentan reproducir la respuesta fisiológica de los pacientes obesos y diabéticos a los tratamientos farmacológicos y dietéticos. Algunos laboratorios farmacéuticos —Eli Lilly, Bristol-Meyers Squibb y Johnson & Johnson— han contratado a Entelos para que les ayude a establecer la prioridad de unos posibles fármacos futuros sobre otros. Pero cuando los científicos de Entelos ajustan la célula virtual de manera que refleje la acción del fármaco, “nos quedamos a menudo muy sorprendidos de lo poco que un cambio profundo del estado celular influye en la dolencia”, dice Trimmer.

Varios biólogos constructores de modelos sospechan que el factor determinante de la reacción de una célula ante un fármaco o una enfermedad no es el que se active o inactive un gen determinado, o que se bloquee cierta proteína, sino la interacción dinámica entre todos los genes y proteínas. Quizá los creadores de modelos se enfrenten a un gran problema: en la mayoría de los sistemas biológicos, no se sabe qué reacciona con qué, ni cuándo.

John R. Koza, experto en computación de la Universidad de Stanford, realizó hace poco un experimento que podría ayudar a los biólogos en la labor de encadenamiento genético. Koza es un pionero de la programación genética, técnica que crea evolutivamente programas de ordenador mandándole a éste que genere programas aleatorios, que los haga mutar rápidamente y que los escrute para detectar los que lleven mejor a cabo la tarea asignada. Koza cierra hermosamente un círculo de metáforas al aplicar la programación genética para remodelar una

Proyectos de células cibernéticas



El Grupo de Investigación de Circuitos Genéticos, dirigido por Bernhard Ø. Palsson (*arriba*), de la Universidad de California en San Diego, está construyendo modelos, basados en sus genomas, de *Escherichia coli*, *Hemophilus influenzae*, *Helicobacter pylori* y otras bacterias patógenas.

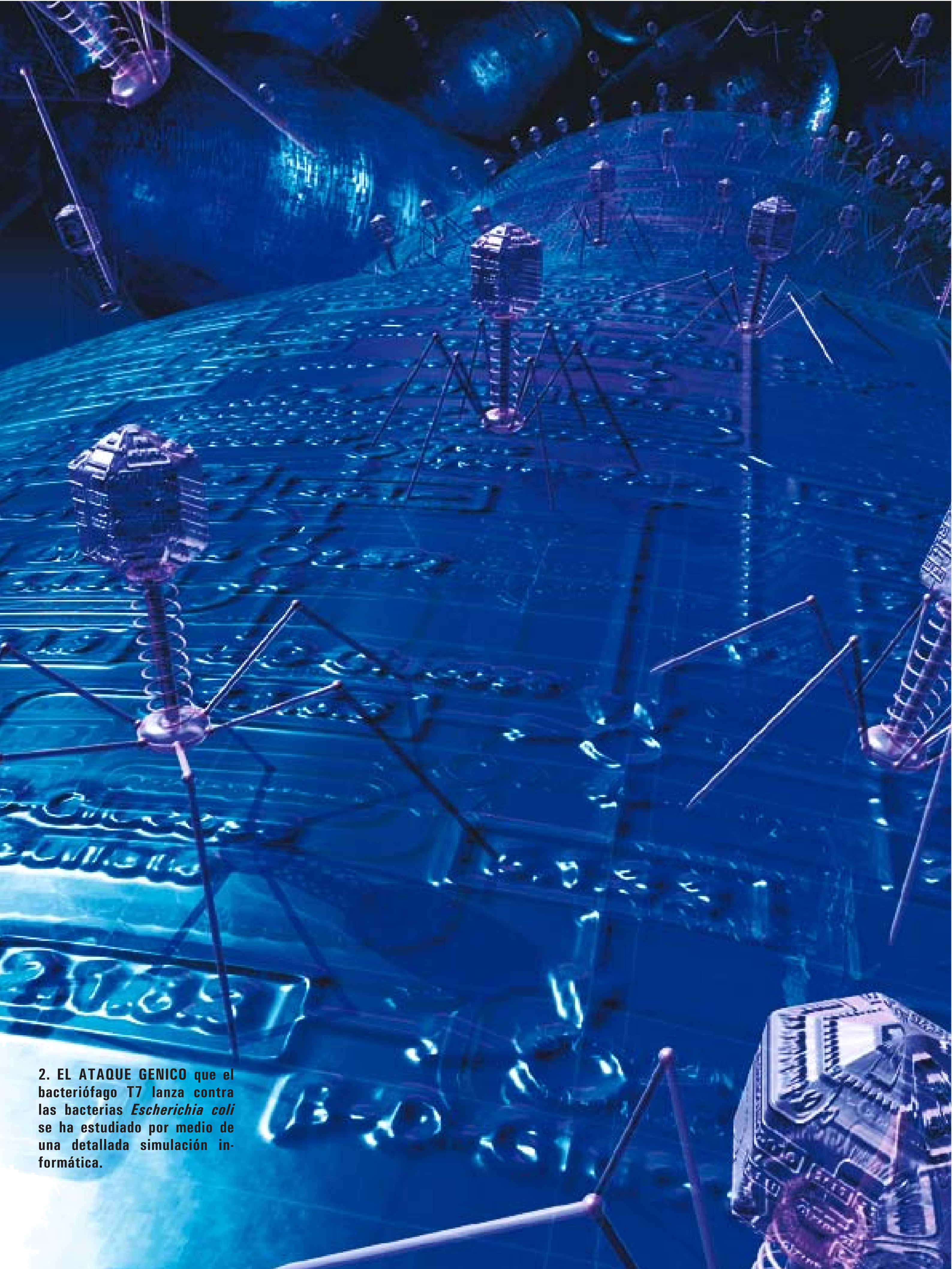
E-Cell es un microbio electrónico construido en el laboratorio de Bioinformática de la Universidad japonesa de Keio a partir de los genes del *Mycoplasma genitalium*.

The Virtual Cell es un paquete de programas para la simulación general de células construido por el Recurso Nacional de Análisis Celular y Construcción de Modelos del hospital clínico de la Universidad de Connecticut.

McCell es una simulación por superordenador de la sinapsis entre una neurona y una célula muscular que han preparado el Instituto Salk y el Centro de Supercomputación de Pittsburgh.

In Silico Cell, construido por Physiome Sciences en Princeton, Nueva Jersey, está escrito en CellML, un lenguaje de programación que esa empresa promueve como *lingua franca* con la que los científicos puedan compartir y combinar sus modelos celulares.

Microbial Cell Project, un programa decenal patrocinado por el Departamento de Energía de Estados Unidos, proyecta gastarse quince millones de dólares al año en el análisis molecular de organismos unicelulares y construir modelos de su bioquímica. *—W.W.G.*



2. EL ATAQUE GENICO que el bacteriófago T7 lanza contra las bacterias *Escherichia coli* se ha estudiado por medio de una detallada simulación informática.

parte, pequeña pero complicada, del modelo E-Cell, que a su vez no es sino unos programas de ordenador que imitan genes.

Koza preparó su sistema de forma que crease evolutivamente programas ensambladores de enzimas conocidas en una maquinaria química que transformara los ácidos grasos y el glicerol en diacilglicerol. Cada programa se convirtió, por conveniencia, en un circuito eléctrico equivalente, cuyo comportamiento se calcula con un simulador de circuitos comercial. Se retuvieron los "circuitos" biológicos que se acercaban más a los patrones de entrada-salida de E-Cell para que sufrieran nuevas evoluciones; se mató a los demás.

Tras un día de cálculos, el superordenador Beowulf, compuesto por mil procesadores, entregó un programa que atinaba con la red de reacciones auténtica. Tenía cuatro enzimas, cinco sustancias químicas intermedias y todos los bucles de retroalimentación correctos. Acertaba hasta con las velocidades de reacción de cada enzima. Había una respuesta "correcta" definida; ninguna otra disposición funcionaba tan bien, ni de lejos.

Koza cree que la programación genética puede abordar problemas mayores, y que quizás un día hasta descubra los caminos retorcidos por los que las células convierten los alimentos en energía, crecimiento y residuos, pero sólo en los casos en que los bioquímicos hayan determinado el procesamiento celular de las sustancias químicas a lo largo del tiempo. Ese tipo de datos aún escasea.

Se ha observado que muchos problemas bioquímicos podrían tener una respuesta óptima. Y en esa confianza el grupo de Palsson ha construido modelos de *E. coli*, *Hemophilus influenzae* y *Helicobacter pylori*, microorganismo éste que se encuentra en las úlceras de estómago. Peinan la literatura para reconstruir redes bioquímicas. "Entonces les imponemos restricciones que han de respetar", explica Palsson. Debe conservarse la masa, por ejemplo. Las cargas eléctricas han de estar equilibradas. La termodinámica hace que muchas reacciones sean irreversibles. "Queremos dar con las soluciones físicamente posibles."

No se trata, apostilla Markus W. Covert, del laboratorio de Palsson, de empeñarse en predicciones perfectas, sino de buscar aproximaciones fiables. Recurre al ejemplo de los ingenieros aeronáuticos, que "proyectan un avión en un ordenador y lo prueban virtualmente sin construir ni un prototipo, pese a que no pueden calcular exactamente cómo fluirá el aire". En febrero, el equipo de Palsson comunicaba que su simulación había predicho correctamente que *E. coli* está maximizada en cuanto al desarrollo, pero no en cuanto a la producción de energía.

Esta manera de afrontar la simulación celular, de arriba abajo, ha arraigado. Gilman comenta que un consorcio universitario por él presidido, la Alianza para la Señalización Celular, ha obtenido fondos federales para construir modelos de las vidas internas de las células musculares cardiacas y de las células B que tienen un papel fundamental en el sistema inmunitario. Calcula que se tardará diez años en completar la tarea, con un coste de diez millones de dólares al año. "Pero cuando dispongamos de modelos de ese corte", predice, "tendremos el más increíble motor para el descubrimiento de fármacos que haya habido. Será posible entonces construir el modelo de una enfermedad en esa célula y ver luego qué se puede hacer con arreglos farmacológicos. Por último —aunque puede que pasen más de diez años—, no me cabe duda alguna de que habrá modelos cuantitativos del funcionamiento de las células, de los órganos y, con el tiempo, de animales enteros."

Bibliografía complementaria

MODELLING CELLULAR BEHAVIOUR. Drew Endry y Roger Brent en *Nature*, vol. 409, páginas 391-395, 18 de enero de 2001.

WHOLE-CELL SIMULATION: A GRAND CHALLENGE OF THE 21ST CENTURY. Masaru Tomita en *Trends in Biotechnology*, vol. 19, núm. 6, págs. 205-210, junio de 2001.



Hasta hace poco eran escasas las pruebas de canibalismo en fósiles humanos, pero parece ahora fuera de toda duda que se trata de una práctica arraigada en nuestro pasado

Prehistoria

Tim D. White



1. CRANEO DE NEANDERTAL procedente del abrigo de Krapina en Croacia. Los antropólogos físicos y los arqueólogos ven en este espécimen y en cientos de otros restos señales de canibalismo. Presenta aplastada la caja craneana para extraer el cerebro y consumirlo.

del canibalismo

El canibalismo nos impresiona, repugna y fascina a partes iguales, se trate de relatos de exploradores hambrientos, de confesiones de supervivientes de accidentes aéreos que se nutren de sus congéneres muertos o descripciones de ritos practicados en Papúa Nueva Guinea. Representa uno de los últimos tabúes de las sociedades occidentales y una costumbre asociada a otras culturas, a otros tiempos y a otros lugares. Hasta el presente, los elementos recabados desde hace varios siglos eran harto confusos e incompletos para poder afirmar que nunca se dio tal práctica, o, por el contrario, que se realizó en tal sitio y durante tal período por tal o cual motivo.

Recientes investigaciones están sacando a la luz la verdad sobre el canibalismo. Mucho antes de la invención de la metalurgia, antes de la construcción de las pirámides de Egipto, antes de la aparición de la agricultura o del arte rupestre paleolítico, se practicaba el canibalismo en numerosos pueblos y entre homínidos antecesores nuestros. Se han descubierto, por millares, huesos rotos y esparcidos en pueblos prehistóricos del sudoeste de Estados Unidos y en las islas del Pacífico. Gracias al perfeccionamiento creciente de las herramientas y de los métodos de análisis, la investigación osteológica y arqueológica de tales yacimientos ha aportado pruebas de la existencia de un canibalismo prehistórico.

El canibalismo humano ha intrigado a los antropólogos desde hace tiempo, empeñados durante decenios en establecer una clasificación del fenómeno, por ejemplo en función del sujeto consumido. Así, el endocanibalismo remite al consumo de individuos que pertenecen al grupo, el exocanibalismo al de personas externas al grupo; por fin, el autocanibalismo abarca desde morderse las uñas hasta el autoconsumo inducido mediante tortura. Los antropólogos han creado también clasificaciones en razón de sus motivaciones presumibles o confesadas. El canibalismo entre supervivientes de un accidente está provocado por el hambre. Tal aconteció en la expedición Donner Party (cuyos miembros quedaron aislados durante el duro invierno de 1846 a 1847 en Sierra Nevada) o entre los jugadores de rugby perdidos en los Andes en 1972, tras un accidente aéreo. Hablamos de canibalismo ritual cuando los miembros de una familia o de una comunidad consumen a sus muertos en el curso de ceremonias funerarias para poder adquirir sus cualidades o para honrar su memoria. Por último, el canibalismo de tipo patológico se refiere a los criminales que consumen a sus víctimas o, más a menudo, se lee aplicado a personajes de ficción, así Hannibal Lecter en *El silencio de los corderos*.

A pesar de estas distinciones, la mayoría de los antropólogos utiliza el término "canibalismo" para designar el consumo regular, culturalmente admitido, de carne humana. En la época de las grandes expediciones etnográficas, vale decir, desde el historiador griego Herodoto (*c.* 400 a.C.) hasta principios del siglo XX, misioneros, militares y antropólogos han explorado países remotos y contado relatos de canibalismo alimentario de América central, islas del Pacífico o de Africa central.

Tales descripciones se han visto a menudo envueltas en la polémica. Deben recibirse con cautela, toda vez que hasta finales del siglo XIX no empezaron a participar antropólogos profesionales en expediciones de ese tenor. En 1937 el antropólogo Ashley Montagu llegaba a afirmar que el canibalismo era un "mito de exploradores".

En 1979, William Arens fue más allá tras revisar el registro etnográfico en su libro *The Man-Eating Myth*. Este antropólogo de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook negaba que los testimonios de canibalismo ritual entre aztecas, maoríes o zulúes carecieran de fiabilidad.

Se reprochaba a los antropólogos que no se limitaran a analizar poblaciones contemporáneas e interpretaran los datos arqueológicos a la luz de los prejuicios de la época. Los hallazgos arqueológicos en Europa y otros lugares despertaban especulaciones sin cuento sobre el canibalismo. En ese ambiente, el escritor norteamericano Mark Twain escribía en 1871 que doquiera se encuentra un montón de huesos de hombres primitivos y bestias mezclados juntos, sin la más mínima señal que indique que el hombre se comió a los osos o que los osos se comieron a los humanos, se reputa, sin el menor escrúpulo, una "prueba" de canibalismo, no importa que el humano muriera hace dos millones de años.

Durante la centuria siguiente, arqueólogos y antropólogos físicos comenzaron a considerar caníbales a los homínidos *Australopithecus africanus*, *Homo erectus* y *Homo neanderthalensis*. De acuerdo con algunas interpretaciones, habría existido canibalismo desde hace tres millones de años hasta épocas muy recientes.

A principios de los ochenta apareció una crítica muy dura contra tales afirmaciones. El arqueólogo Lewis Binford, en su libro *Bones: Ancient Men and Modern Myths*, sostenía que el supuesto canibalismo de los primeros homínidos carecía de fundamento. Fundado en el trabajo de otros prehistoriadores interesados en la composición, contexto y modificaciones en las asociaciones de huesos del Paleolítico, Binford subrayó la necesidad de apoyarse en la experimentación y observación de civilizaciones contemporáneas para estudiar el comportamiento del pasado en el presente. Su influyente trabajo combinaba el escepticismo con la defensa del rigor metodológico en los estudios del canibalismo prehistórico.

El autor

TIM D. WHITE es codirector del laboratorio de investigación de evolución humana instalado en el museo de zoología de vertebrados adscrito a la Universidad de California en Berkeley. Comparte también la jefatura de las excavaciones del valle medio del río Awash en Etiopía.

2. El APLASTAMIENTO constituye uno de los signos del consumo de huesos humanos. En los huesos canibalizados pueden observarse alteraciones de diverso tipo. Cuando estas señales son idénticas a las que nos muestran los huesos de animales del mismo yacimiento, los arqueólogos entienden que los restos humanos se prepararon de idéntico modo y por la misma razón: para su consumo. Estos cinco metatarsianos (parte del esqueleto del pie) proceden del Cañón de Mancos, lo mismo que los huesos del resto de las ilustraciones; se aplastó el hueso esponjoso para extraer los nutrientes.

Diversidad de ritos funerarios

El estudio de caníbales contemporáneos nos sería muy útil, pero esta oportunidad se ha perdido casi del todo. Hemos, pues, de abordar el fenómeno desde las ciencias históricas. La arqueología se convierte así en el medio principal para investigar la existencia del canibalismo humano y su extensión.

Sin embargo, una de las dificultades que se presentan a los arqueólogos es la increíble diversidad de rituales funerarios. Los cuerpos pueden ser enterrados, incinerados, colocados en andamios, arrojados al agua, dejados en troncos de árboles u ofrecidos a los carroñeros. Los huesos se exhuman, lavan, pintan, sepultan en grupo o dispersan sobre las piedras. Los arqueólogos de mañana se las verán y desearán para reconocer qué tipo de práctica funeraria se utiliza hoy en algunas partes del Tíbet. En efecto, los cuerpos, descuartizados, se dejan expuestos para buitres y otros carnívoros; luego, se recogen los huesos, se reducen a polvo, se mezclan con cebada y harina, para ofrecerlos de nuevo a los buitres. Dada la gran variedad de destinos de los huesos y los cuerpos, distinguir el canibalismo de otras prácticas funerarias puede ser bastante difícil.

Se ha establecido un elenco muy riguroso de criterios para reconocer la existencia del canibalismo. Se puede confirmar esta actividad cuando los patrones de procesamiento que se observan en los restos humanos son iguales a los que se observan en huesos de otros animales que se han consumido. Los arqueólogos vienen apelando, desde hace tiempo, a esta comparación entre restos humanos y animales encontrados en un mismo yacimiento. En su opinión, las señales que muestran los huesos animales y la disposición en que se han dejado indican que el animal fue sacrificado para su consumo. Cuando los restos humanos son desenterrados en contextos similares, con las mismas señales incisas, el mismo estado de conservación y abandonados de igual manera, podemos inferir que nos hallamos ante un episodio de canibalismo.

Cuando un mamífero devora a otro, suele dejar marcas y estrías en el esqueleto del animal consumido. En vida, los tejidos blandos, con valor nutritivo, recubren los huesos de los mamíferos. Pero cuando se arrancan los tejidos, quedan en los huesos las marcas de mordeduras y de fracturas, que revelan el procedimiento del agresor. Ahora bien, cuando los humanos consumen a otros animales dejan en los huesos algo más que simples marcas de dientes, pues se han servido de útiles de piedra o metal, actividad reflejada en señales de corte de los huesos. Podemos hallar esas mismas marcas en los esqueletos humanos que han sido objeto de descuartizamiento.

Para establecer la existencia de canibalismo humano es preciso descubrir las pistas del proceso —marcas de corte, machacamientos, fracturas o cremaciones—, así como la presencia de huesos, o partes de ellos, intactos. En el interior de los huesos residen tejidos de alto valor nutritivo, como el cerebro y el tuétano; y sólo pueden extraerse rompiendo los huesos, lo que deja señales inequívocas. Cuando ese tipo de trazas, asociadas a la preparación, aparecen en los huesos de un yacimiento, podemos pensar en prácticas caníbales. Podemos confirmar la hipótesis de un canibalismo alimentario con otros datos arqueológicos, en particular gracias a restos animales consumidos en yacimientos que pertenecen al mismo tipo de cultura.

Este método comparativo descansa en la presencia de distintos tipos de trazas sobre el hueso y en las pruebas contextuales. Pero la sola presencia de marcas de corte no constituyen en sí misma una prueba concluyente. Por ejemplo, los huesos procedentes de un cementerio revelarían incisiones de bayoneta y los cadáveres diseccionados en una facultad de medicina señales de corte, sin que ni en uno ni en otro caso se trate de canibalismo.

Con criterios de reconocimiento tan estrictos, no podrían identificarse la mayoría de los episodios de canibalismo del pasado. Debemos a los etnógrafos la descripción de



cierto rito caníbal de Papúa Nueva Guinea: los cráneos de los muertos se limpiaban con sumo cuidado para extraerles el cerebro. Una vez secos, los cráneos, casi intactos, se manipulaban una y otra vez, con el desgaste consiguiente de los salientes. En ocasiones los pintaban y colocaban sobre postes para exhibirlos como objetos de culto. Los tejidos blandos, incluido el cerebro, se consumían al principio de tales preparativos; es decir, se trata de una práctica de canibalismo ritual. Ahora bien, si los cráneos en cuestión se hubieran encontrado en un contexto arqueológico sin las informaciones de que disponemos sobre esa forma de canibalismo, no constituirían una prueba de canibalismo, de acuerdo con los criterios en vigor.

Ello no obstante, y sin apartarnos de criterios tan restrictivos, hemos descubierto indicios de canibalismo en yacimientos más antiguos. Las mejores indicaciones de canibalismo prehistórico proceden del registro arqueológico del sudoeste de Norteamérica. Allí se han encontrado pruebas convincentes en decenas de agrupaciones de restos humanos. También se han hallado testimonios sólidos de esa práctica en la Europa del Neolítico y de la Edad del Bronce. En la cueva de Fontbregoua, en el Var, por ejemplo. Incluso el yacimiento europeo más antiguo que ha proporcionado restos humanos contiene indicios de canibalismo.

3. MACHACANDO. A partir del registro arqueológico sabemos que la carne que rodea al hueso (grasa, músculo u otros tejidos) no es la única parte del cuerpo que se consumía. A menudo, se rompían los cráneos y se extraía el tuétano de los huesos largos. En estos dos ejemplos, con percutores de piedra se hendieron longitudinalmente los huesos del brazo para acceder al tuétano.

Los primeros caníbales europeos

El yacimiento paleoantropológico más importante de Europa se encuentra en el norte de España, en las laderas de la Sierra de Atapuerca. Las actividades humanas prehistóricas en las cuevas de esta sierra formaron innumerables yacimientos, pero el más antiguo conocido es la Gran Dolina, en curso de excavación en la actualidad. El equipo que allí trabaja ha recuperado las pruebas de una ocupación humana de hace unos 800.000 años protagonizada por *Homo antecessor*, una nueva especie antepasada de los humanos. Los huesos de homínidos de uno de los niveles del sedimento que rellena la cueva aparecen mezclados con instrumentos líticos y otros restos de animales prehistóricos cazados (como el ciervo, el bisonte y el rinoceronte). Se han recuperado 92 fragmentos de huesos humanos pertenecientes a seis individuos. Estos tienen inconfundibles marcas de corte producidas con útiles líticos, incluyendo marcas de despellejamiento y la extracción de carne, así como el procesamiento del cráneo y de los huesos largos para obtener el tuétano. El mismo patrón de procesamiento se observa en los huesos de animales que aparecen junto a ellos. Se trata de la prueba más antigua de canibalismo.

A finales del siglo XIX, el paleoantropólogo croata Dragutin Gorjanoviè-Kramberger descubría en el sedimento arenoso del abrigo de Krapina los restos de más de 20 neandertales ¿Practicaban el canibalismo los neandertales europeos, que vivieron entre hace 35.000 y 150.000 años? Esos huesos, hallados fragmentados y desparramados, portaban marcas de corte. Para nuestro infortunio, las piezas, muy frágiles, se extrajeron sin las debidas precauciones y se cubrieron con gruesas capas de consolidante que enmascaran las trazas posibles de instrumentos líticos y hacen extremadamente difícil la interpretación. Opinan algunos que los huesos neandertales de Krapina ofrecen indicios claros de canibalismo; otros atribuyen los patrones de fracturación a las caídas de bloques del techo de la cueva, a mordiscos de carnívoros (lobos, hienas, etc.) o a ritos de inhumación neandertales. Pero análisis recientes de los huesos de Krapina y de huesos de Vindija, otra gruta croata que contiene restos de neandertales y de fauna más recientes, indican que el canibalismo se practicó en ambas cuevas.

En los últimos años, otro yacimiento neandertal confirma el fe-

4. LAS MARCAS que se observan en el lado izquierdo de este fragmento de tibia humana se producen al cortar el tendón y el músculo. Se servían también de útiles para cortar tiras, extraer carne o separar la cabeza del tronco. Con todo, los arqueólogos deben ser muy cautelosos en sus interpretaciones, porque no toda traza de corte indica, por necesidad, un episodio de canibalismo, habida cuenta, además, de la diversidad de ritos funerarios.



nómeno. A orillas del río Ródano, en Ardèche, Alban Defleur, de la Universidad de Marsella, viene excavando la cueva de Moula-Guercy desde hace nueve años. Los neandertales ocuparon el lugar hace aproximadamente unos 100.000 años. En uno de los niveles, el equipo desenterró los restos de al menos seis neandertales (un niño de seis años y adultos). La meticulosa excavación y recuperación de Defleur han proporcionado datos equivalentes a la investigación forense en un caso criminal. Estableció la ubicación precisa (según las tres dimensiones del espacio) de cada fragmento de hueso de animal o de neandertal, de cada pista botánica y de cada instrumento lítico. Merced a esa labor minuciosa, nos ha sido dado a conocer de qué modo se esparcieron los huesos en torno a un hogar que se apagó hace más de mil siglos.

Además, los análisis microscópicos de los fragmentos óseos de neandertales y de la fauna han conducido a las mismas conclusiones que el equipo español del yacimiento, más antiguo, de la Gran Dolina: ciertos europeos del Paleolítico practicaron el canibalismo. Más difícil resulta determinar con qué frecuencia y bajo qué circunstancias. Por lo que a la frecuencia se refiere, parece que no se trataba de episodios aislados. Entre los yacimientos más antiguos de Europa sólo uno contiene fósiles humanos, y éstos fueron canibalizados. Los dos yacimientos croatas de neandertales están separados por cientos de generaciones, pero los análisis muestran que en ambos se practicó el canibalismo. Y ahora el yacimiento neandertal de Moula-Guercy apoya la misma interpretación. Todos los hallazgos contienen el mismo tipo de pruebas. Así las cosas, la mayoría de los paleoantropólogos no se pregunta si los primeros homínidos eran caníbales, sino qué les indujo a ello.

Canibalismo en América del Norte

En esa línea, los descubrimientos realizados desde hace 30 años en yacimientos del sudoeste norteamericano han modificado nuestra opinión sobre la cultura de los anasazi, que vivieron, desde el siglo primero antes de nuestra era hasta el 1600 d.C., en la región de los *Four Corners* en el sudoeste norteamericano (situada entre los estados de Nuevo México, Arizona, Utah y Colorado). Cultivaban el maíz y construían sus aldeas y viviendas en espectaculares acantilados. Nos han dejado uno de los registros arqueológicos más ricos y detallados de todo el mundo. Christy G. Turner II, de la Universidad estatal de Arizona, estudió en los años sesenta y setenta del siglo XX los conjuntos de huesos humanos quemados y fragmentados pertenecientes a yacimientos anasazi de Arizona, Nuevo México y Colorado. Un asentamiento tras otro, todos mostraban restos humanos con marcas reveladoras. Pero en la historia más reciente de los indios pueblo hay muy pocas pruebas de que el canibalismo fuera una práctica muy extendida, y a algunas tribus actuales que se consideran descendientes de los anasazi les molestan las afirmaciones de canibalismo entre sus antepasados.

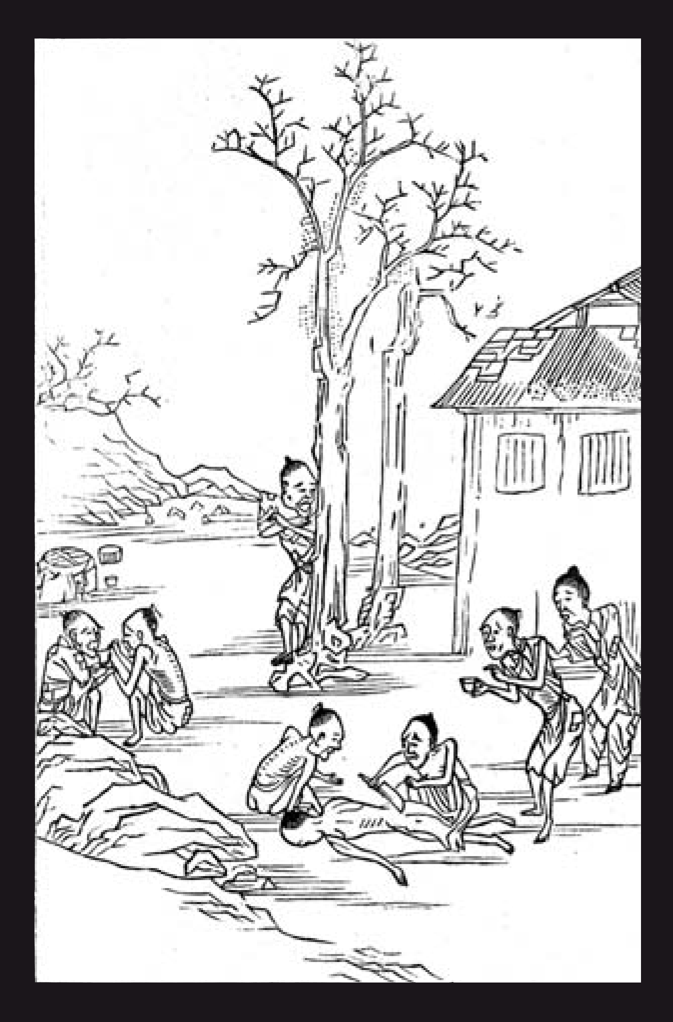
La mayoría de las sepulturas anasazi presentan esqueletos completos articulados, acompañados de vasijas de cerámica decoradas, muy codiciadas por los furtivos. Según Turner varias decenas de yacimientos alojaban restos humanos fragmentados y quemados, que evocan una práctica más común que la mera inhumación. A lo largo de los últimos 30 años el número total de huesos humanos recuperados en estos yacimientos se cuenta por decenas de miles. Corresponden a individuos repartidos por decenas de miles de kilómetros cuadrados del sudoeste norteamericano y abarcan 800 años de prehistoria. Por ejemplo, el conjunto de la cultura anasazi que analicé hace diez años en el cañón Mancos (sudoeste del estado de Colorado) contenía 2106 fragmentos de huesos de como mínimo 29 indios norteamericanos: hombres, mujeres y niños.

Estos conjuntos óseos han aparecido en diferentes asentamientos, desde aldeas hasta ciudades. Datan, a menudo, de la misma época en que se abandonaron los asenta-



5. CREMACION. Las áreas oscuras y dañadas de estas cuatro apófisis mastoides (protuberancia ósea que hay detrás de la oreja) indican que los cráneos se quemaron. Puesto que la región mastoidea no está recubierta de una cantidad notable de tejido muscular, la cremación resulta mucho más intensa que en otras partes del cráneo. Los patrones de cremación demuestran la existencia de prácticas culinarias.

DESCRIPCIONES HISTORICAS



En el sucederse de los siglos los relatos etnográficos han venido consignando prácticas de canibalismo en diferentes partes del mundo. Algunas descripciones recogen la observación directa, pero otras contadas por exploradores, misioneros, viajantes y soldados merecen muy poca credibilidad. Estas dos creaciones artísticas pintan el canibalismo impuesto por la hambruna que padeció China a finales del siglo XIX y una visión europea del canibalismo en el Nuevo Mundo (a partir de un grabado en madera de 1497). Aunque carecen de solidez contrastada, podrían orientar futuras excavaciones arqueológicas.



mientos en cuestión. Los huesos presentan indicios de haberse quemado la carne antes de retirarla. De lo observado se desprende que se extraía el cerebro y rompía los huesos de las extremidades para obtener el tuétano después de cortar los tejidos musculares. Algunos de los fragmentos tienen pulidos sus extremos, un fenómeno que se relaciona con el cocinado en vasijas de cerámica. Los fragmentos de hueso humanos de Mancos muestran modificaciones iguales a las dejadas por los anasazi cuando preparaban la caza (el ciervo o las cabras de las Montañas Rocosas). Las pruebas osteológicas demuestran que los humanos fueron despellejados y cocinados, extraídos los músculos, rotas las articulaciones, fracturados con yunques y martillos de piedra los huesos largos y aplastado el tejido esponjoso de los huesos; los fragmentos se cocieron luego en vasijas de cerámica. Pero esos resultados han sido objeto de polémica. Sin embargo, la oposición a las interpretaciones de canibalismo parece más objeto de la política que de la ciencia. Para numerosos paleoantropólogos el canibalismo constituye una práctica tan reprobable, que rechazan las pruebas.

En otoño del año pasado Richard A. Marlar y su grupo, de la facultad de medicina de la Universidad de Colorado, aportaban la prueba más convincente de canibalismo en los yacimientos anasazi del sudoeste de Norteamérica. Excavaron en tres fosas anasazi, fechadas en el 1150 d.C., pertenecientes al yacimiento de Cowboy Wash, cerca de Mesa Verde, en el sudoeste de Colorado. Encontraron el mismo patrón que había sido documentado en otros yacimientos (así, el de Mancos): huesos humanos desarticulados, rotos y dispersos, sin indicios de sepulturas. Gracias a su excelente conservación, la cuidadosa excavación y un muestreo riguroso, se pudieron realizar los oportunos análisis químicos y encontrar pruebas directas de canibalismo humano.

El equipo de Marlar halló en una vasija de cerámica restos de mioglobina humana (una proteína presente en el corazón y en los

músculos), lo que indicaría la cocción de carne humana en el cacharro. Además, en un coprolito humano (restos fecales fosilizados) no calcinado, recogido en unos de los fogones de estos asentamientos abandonados, se encontró también mioglobina humana.

En resumen, los datos osteológicos, arqueológicos y bioquímicos indican que el canibalismo prehistórico ocurrió en Cowboy Wash. La información bioquímica del proceso y consumo de tejidos humanos proporciona importantes pruebas adicionales a los descubrimientos osteológicos y arqueológicos del sudoeste.

Causas del canibalismo

Es mucho más difícil conocer las causas del canibalismo que establecer su existencia. El hombre come ante el estímulo del hambre. ¿Cómo saber si el canibalismo representaba un medio de subsistencia o de deshacerse de los enemigos? Ni siquiera en el caso de los anasazi, objeto de numerosos estudios, puede determinarse si el canibalismo fue el resultado del hambre, de rituales funerarios o de la combinación de estas u otras razones. Cualquiera que fuera la causa, el canibalismo forma parte de nuestro pasado colectivo.

Bibliografía complementaria

DOES MAN EAT MAN? INSIDE THE GREAT CANNIBALISM CONTROVERSY. L. Osborne en *Lingua Franca*, vol. 7, n.º 4, páginas 28-38; abril-mayo 1997.

FIJIAN CANNIBALISM: OSTEOLOGICAL EVIDENCE FROM NAVATU. D. DeGusta en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 110, páginas 215-241; octubre 1999.

NEANDERTHAL CANNIBALISM AT MOULA-GUERCY, ARDÈCHE, FRANCE. A. Defleur, T. D. White, P. Valensi, L. Slimak y E. Crégut-Bonnoure en *Science*, vol. 286, páginas 128-131; octubre 1999.

BIOCHEMICAL EVIDENCE OF CANNIBALISM AT A PREHISTORIC PUEBLOAN SITE IN SOUTHWESTERN COLORADO. R. A. Maralar, B. L. Leonard, B. R. Billman, P. M. Lambert y E. Marler en *Nature*, vol. 407, páginas 74-78; 7 de septiembre, 2000.



Siembra mortífera en Laos

Las bombas todavía activas desde la guerra de Vietnam siguen matando gente e impidiendo el desarrollo agrícola de Laos. El proyecto de limpieza exigió descifrar ficheros informáticos de varios decenios de antigüedad

Daniel Lovering



1. LOS **ARTIFICIEROS** examinan el terreno tras una detonación controlada de armas de la guerra de Vietnam para asegurar que no quedan focos residuales de incendios.

En un despacho asomado a las polvorientas calles de Vientian, capital de Laos, Michael Sheinkman contempla en la pantalla de su ordenador un mapa digitalizado en blanco y negro del país. Un solo clic del ratón hace aparecer toda una constelación de puntitos rosa, como un sarpullido que cubre el territorio. En cada punto puede haber una bomba sin explotar.

Estas marcas, triste herencia de una de las campañas de bombardeo más asoladoras de la historia mundial, señalan las coordenadas de los objetivos de la aviación norteamericana durante el largo episodio de Vietnam. La fuerza aérea de EE.UU. arrojó más de dos millones de toneladas de bombas sobre la Ruta Ho Chi Minh, que serpenteaba por las selvas del este de Laos para abastecer a los norvietnamitas.

"Los gráficos revelan claramente que los objetivos estaban en las llanuras y en las vías de comunicación", afirma Sheinkman, geógrafo estadounidense dedicado a la ardua labor de localizar y neutralizar los proyectiles sin detonar. "Lo malo para la gente de Laos es que, treinta años después, las tierras llanas son muy difíciles de conseguir."

Las minas terrestres, amenaza tal vez más conocida, sólo suponen un 4 por ciento de las bombas aún sin estallar en Laos. Estas son, en su mayoría, bombas de aviación fabricadas en los Estados Unidos que yacen semienterradas u ocultas entre espesos bosques de bambú; además hay proyectiles de artillería, granadas de mano, cohetes anticarro y demás tipos de armas procedentes de China, Francia, Rusia u otros países, que suelen ser más visibles.

Estas bombas que en su día no explotaron han costado luego muchas vidas humanas. Más de 10.000 personas muertas o mutiladas, el deterioro de la salud pública y un grave obstáculo para la pequeña y frágil economía de Laos, sobre todo para el fomento de la agricultura.

Al finalizar la guerra en 1975, unas brigadas intentaron neutralizar bombas fallidas en anchas fajas de terreno, con éxito limitado. Pero hasta mediados los noventa no puso el gobierno de Laos en marcha un programa más refinado, de ámbito nacional, denominado UXO (cuya sede está en Vientian), el cual cuenta con el apoyo de organizaciones de cooperación internacional. Localizar y neutralizar las armas no explotadas (*unexploded ordnance, UXO*) es la minuciosa y peligrosa labor de un equipo de 628 artificieros y 23 asesores extranjeros.



2. CINTAS DE NUEVE PISTAS como las aquí ilustradas contenían información en códigos comprimidos sobre los bombardeos en la Guerra de Vietnam. (Cada ocho minutos durante nueve años un avión soltaba su carga explosiva.) Interpretar los datos exigió años de tenaz investigación en los archivos militares y una inteligente labor de arqueología informática.

Durante los dos últimos años, Sheinkman, que antes trabajara para un contratista estatal llamado Management Support Technology y ahora para la Federal Resource Corporation, ha ayudado al equipo a utilizar los historiales de bombardeo de los EE.UU. y las técnicas de digitalización de mapas para la identificación de las zonas de riesgo. Su misión se enmarca en la asistencia en capacitación y equipos que desde hace tres años presta la Oficina Humanitaria de Limpieza de Minas del Departamento de Defensa de EE.UU. al UXO de Laos. A finales de 1998, Sheinkman y sus colaboradores laosianos empezaron a cartografiar viejas rutas de bombardeo susceptibles de contener cargas todavía sin estallar.

Rastreo de bombas

Los mapas digitales desplegados por el despacho de Sheinkman incorporan datos de bombardeo que han tenido que extraerse penosamente de los historiales guardados en soporte electrónico por el ejército de EE.UU. durante la contienda. Roy Stanley, oficial retirado de las Fuerzas Aéreas y estadístico del Departamento de Energía, inició el proyecto hace ocho años a raíz de un afortunado descubrimiento.

Stanley, que dedicaba parte de su tiempo en Washington a preparar una historia de la fuerza aérea, y terminaba en ese momento de archivar documentación relativa a combates de la Segunda Guerra Mundial, se disponía, en unión de otros colegas de la Oficina de Apoyo Histórico de la base aérea de Bolling, a escribir una historia de las operaciones aéreas durante el conflicto de Vietnam. Rebuscando por la biblioteca de la dependencia encontró un índice de las misiones de bombardeo de EE.UU. en aquella contienda y se quedó estupefacto: "Había páginas y más páginas con bases de datos de la época de la guerra de Vietnam. Era realmente increíble."

El hallazgo de este índice, perteneciente a un estudio de la Rand Corporation en 1976, movió a Stanley a buscar las propias cintas magnéticas, que almacenarían largas series de códigos numéricos, hoy desconocidos, que utilizarían los militares estadounidenses en aquellos tiempos. Stanley comprendió que esas cintas —si es que todavía existían— deberían indicar tipos de bombas y de aviones, coordenadas de objetivos y otras informaciones sobre las misiones de bombardeo de EE.UU. en el



3. ESTA ETIQUETA procedente de un distribuidor de bombas se encontró en un campo de Laos, donde probablemente ha pasado los últimos treinta años.

sudeste asiático. Pero los analistas del Ejército no sabían nada de tales grabaciones.

Stanley exploró en medios más cercanos, en los Archivos Nacionales de Maryland. Encontró allí cintas de carrete abierto, algunas de ellas deterioradas, así como correspondencia que confirmaba haber borrado, durante la guerra y más tarde, muchas de las bases de datos que él estaba buscando, al no hallar los mandos razones para conservarlas. Thomas E. Brown, responsable de los servicios de archivo en la División de servicios de registro en medios electrónicos y especiales de los Archivos Nacionales, sostiene que ciertas bases de datos sobre combates aéreos en Vietnam nunca se remitieron del Departamento de Defensa a los Archivos Nacionales, y además asegura que algunas se destruyeron. Aunque ya desde 1968 existían directrices informales sobre conservación de los registros electrónicos, éstas tardaron años en aplicarse oficialmente.

Salvando estas contrariedades, Stanley encontró en cintas de los Archivos Nacionales dos bases de datos útiles que figuraban en el índice Rand: el Fichero de Actividades de Combate que detalla las misiones de vuelo sobre el sudeste asiático desde octubre de 1965 hasta diciembre de 1970, y las misiones documentadas que se realizaron entre enero de 1970 y agosto de 1975. Estas bases de datos, intactas ambas, fueron compiladas en grandes ordenadores IBM 360 y 370 utilizando el programa NIPS (siglas en inglés del Sistema Nacional de Procesamiento de Información de órdenes militares con ficheros en formato del Sistema 360). Desarrollado por IBM para el Gobierno en los años sesenta, el NIPS se comporta como cualquier otro programa de base de datos, creando, estructurando, manteniendo y revisando ficheros de datos. Pero los detalles de las misiones en Laos —un avión soltaba su carga de bombas con una frecuencia media de ocho minutos durante nueve años— fueron codificados para ahorrar espacio de almacenamiento, muy limitado en los ordenadores de entonces. En palabras de Brown, "lo que encontramos son datos comprimidos e imbricados (estructurados dentro de otros datos). Tenemos un campo fijo con información sobre órdenes de vuelo y campos adicionales que identifican cada rama de la misión".

Los cambios de codificación estaban muy mal documentados, y ello dificultaba aún más la interpretación de la base de datos. "A veces se reutilizaban códigos y los procesadores de datos asignaban nuevos valores a esos códigos", explica Brown, "sin incorporar los cambios en los manuales del sistema ni haber conservado las primeras versiones de esos manuales." Como ejemplo, en la base de datos de los Archivos Nacionales correspondiente al sudeste asiático hay un manual de fecha 1975, pero no es seguro que su información valga para años anteriores. En suma, los datos codificados sencillos contenían informaciones imbricadas, y podría variar el significado de los propios códigos.

En 1994, Stanley percibió una subvención de 10.000 dólares del Departamento de Defensa para acometer un estudio de factibilidad de los datos, sin sospechar todavía que servirían al UXO laosiano para salvar vidas humanas. Consiguió la colaboración de Management Support Technology, empresa estatal que contrataría a Sheinkman en Laos para descifrar las bases de datos. Esta firma buscó entonces la ayuda de un antiguo programador de IBM que trabajara sobre la base de datos original, creando rutinas lógicas para convertir los datos NIPS en ficheros de texto claro y legibles por un ordenador personal moderno. Tales trabajos dejaron al descubierto otro nivel a investigar. "Los propios datos extraídos estaban codificados", señala Skip Jacobs, quien colaboró con Stanley en la creación de la nueva base de datos.

En 1996, casi cuatro años después de iniciar su investigación, Stanley encontró su piedra de Rosetta. En un sótano de la base aérea de Hickam en Hawai, donde se amontonaban materiales de archivo, descubrió unos listados de ordenador que contenían códigos para las bases de datos de la época de Vietnam. Merced a tal hallazgo resolvió del 85 al 90 por ciento de todos los códigos. Con sus colegas, procedió a estructurarlos en una base de datos moderna y de fácil acceso.

Durante la conversión de los datos, Stanley se encontró con informaciones fragmentadas, traspuestas o claramente erróneas que tal vez se habrían introducido en la cadena de mando durante la guerra. Por

El autor

DANIEL LOVERING, graduado por la Universidad de Columbia, completó su formación en la Escuela de Estudios Internacionales Avanzados de la Universidad Johns Hopkins.

Días de destrucción

La localización de las bombas permite explosionarlas con seguridad

CHANTHAVONG INTHAVONGSY goza de una rara habilidad para descubrir bombas sin explotar. Esta joven experta de 22 años dirige un grupo de cuatro técnicos en Champassak, tranquila provincia del sur de Laos. Con un destello ilumina la sección de cola de algo que reconoce ser una bomba aérea MK-81 posada sobre un lecho de hojas secas. Tras examinar la bomba, decide que puede transportarse con seguridad. Por supuesto, esto no ocurre siempre. Hay bombas con fusibles mecánicos sensibles que deben destruirse *in situ*. Inthavongsy sabe cómo hay que actuar en cada caso. Su equipo, igual que otros participantes en el programa nacional UXO de Laos, descubre a menudo bombas de 113 kilogramos clavadas en el suelo o enteramente a la vista en el interior de la selva, tomando como guía los datos de bombardeo de EE.UU. y los relatos de aldeanos.



EL EQUIPO de neutralización examina cuidadosamente una bomba recién descubierta para determinar su peligro potencial.

Se han localizado así docenas de bombas aéreas de diferentes tipos, algunas de más de 900 kilogramos. Son especialmente preocupantes en Laos los millones de pequeñas bombas múltiples antipersonas, apodadas “bombitas”, debido a los fusibles centrífugos diseñados para armar la bomba mientras cae por el aire. Los artificieros tienen que examinar con sumo cuidado esos fusibles para saber si la bomba está armada o no. Aunque el UXO laosiano conoce bien casi todos los tipos de bombas estadounidenses, hay algunos que todavía retiene como materia clasificada el gobierno norteamericano. Los expertos han descubierto, además, varias bombas aéreas de gran tamaño que no han sido capaces de identificar.

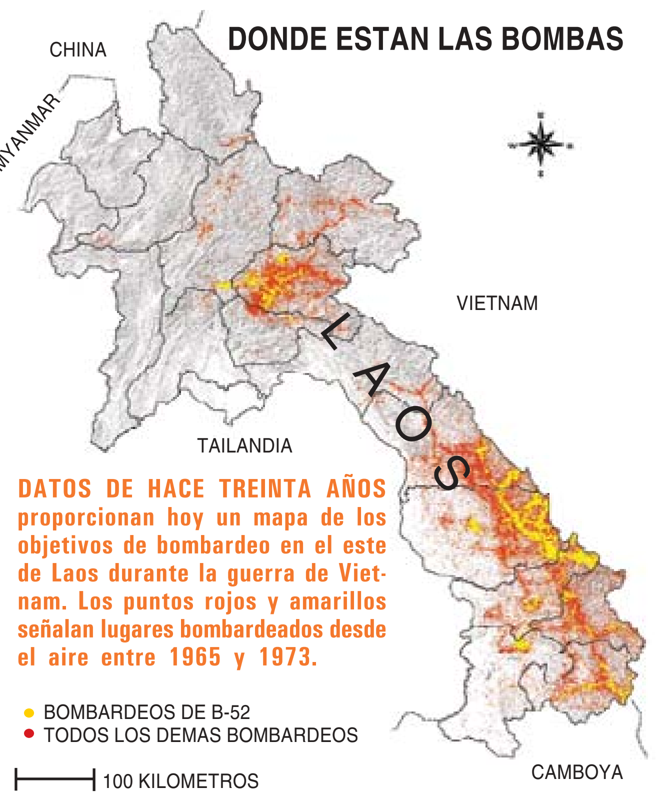
Los artificieros cargan las herrumbrosas bombas en una camioneta Toyota equipada con GPS y se dirigen a un centro de neutralización situado a unos pocos kilómetros. En un solitario macizo de jungla, con una casamata de troncos protectora en sus inmediaciones, realizan un procedimiento de rutina para desactivar la bomba MK-81. Lo que se pretende es evitar la detonación llamada de primer orden, es decir, la explosión a plena potencia de la bomba. Se intenta la detonación de segundo orden; en ésta, el contenido de la bomba se quema con rapidez y el estallido es relativamente pequeño.

Como precaución, se evacuan los habitantes de la zona y los artificieros se guarecen en el refugio, preparados para soportar un fuerte estallido capaz de abrir un hoyo de dos metros en el suelo.

Para provocar la explosión de segundo orden, los técnicos utilizan un dispositivo consistente en un pequeño tubo de aluminio relleno de 80 gramos de explosivo plástico y rematado por una delgada lámina de cobre. Dicho tubo traspasa la cubierta exterior de la bomba y prende la mezcla de TNT con otros materiales explosivos de su interior. La carcasa de la bomba se parte y su contenido arde casi instantáneamente, causando daños relativamente escasos al entorno. “Suele atacarse explosivamente la munición desde el exterior, utilizando una carga de potencia suficiente para desencadenar una reacción química, pero no para producir una detonación de primer orden”, afirma Sidney Alford, técnico en explosivos británico que desarrolla las técnicas de neutralización de bombas aplicadas en Laos.

Un miembro del equipo coloca el tubo de 80 milímetros que emerge de la bomba e inserta un casquete detonador conectado por cable a un conmutador eléctrico situado en el refugio distante. Cuando Inthavongsy termina la cuenta atrás, el conmutador se acciona a mano emitiendo un zumbido, y la carga eléctrica se propaga por el cable para provocar el estallido. Trozos de metralla vuelan por los aires. Pasados unos minutos, Inthavongsy y sus colegas salen del refugio y se dirigen al escenario de la explosión. La neutralización ha tenido éxito: la tierra está quemada y pequeños incendios salpican la maleza, pero la zona ha quedado prácticamente intacta.

—Daniel Lovering



DATOS DE HACE TREINTA AÑOS proporcionan hoy un mapa de los objetivos de bombardeo en el este de Laos durante la guerra de Vietnam. Los puntos rojos y amarillos señalan lugares bombardeados desde el aire entre 1965 y 1973.

ejemplo, el Falcon AIM-4, un misil aire-aire de 64 kilogramos, iba montado en los aviones F-102 y F-4D/E de EE.UU., pero la base de datos de actividades de combate informa que se utilizaba en los F-100 y F-105, entre otros. “Hablamos de tarjetas perforadas”, puntualiza Jacobs. “Es fácil que se hayan introducido errores al copiar o teclear datos.”

(Inesperadamente esta investigación explicó en parte los informes erróneos de CNN y *Time* sobre una misión secreta estadounidense en Laos durante la guerra de Vietnam que se denominó Tailwind. Las agencias de prensa afirmaron que el ejército norteamericano había utilizado en Laos bombas mortíferas de gas neurotóxico contra los desertores. Según Stanley, en el informe se utilizaba el código de bombas CBU-15, que se aplicó transitoriamente a una bomba múltiple normal aunque denominaba también una bomba de gas experimental, cuyas pruebas se suspendieron en 1970.)

El trabajo de Stanley atrajo la atención de los estamentos militares estadounidenses en 1995, y la Oficina Humanitaria de Limpieza de Minas procedió a encomendar a Management Support Technology un estudio más extenso que habría de utilizarse en Laos.

Interpretación de los datos

En la Oficina Nacional del UXO laosiano en Vientian, Sheinkman introduce los datos aportados por Stanley en un sistema de información geográfica. El programa señala en puntos de color rosa las coordenadas de blancos vinculadas a la base de datos de bombardeo. Se imprimen los mapas obtenidos, que luego emplean los expertos equipados con unidades GPS móviles, capaces de localizar coordenadas sobre el terreno por medio de satélites de navegación. Los mapas, que también incluyen datos empíricos tomados de la realidad, muestran a los técnicos lo que podrían encontrar al escudriñar aldeas y arrozales. Pero no pueden determinar con precisión los restos de la guerra. No saben lo que explotó y lo que no explotó. Y las zonas que en el mapa parecen despejadas tal vez estén infestadas de otro tipo de explosivos. Un hecho alentador es que los datos hasta ahora utilizados han sido exactos. “Estamos encontrando las bombas muy cerca de donde indican las coordenadas”, declara Jacobs.



4. “LA BOMBITA” es el explosivo sin estallar más peligroso por su pequeño tamaño e inofensiva apariencia. Millones de ellas cayeron sobre Laos.



5. ARANDO EL CAMPO este agricultor, llamado Southhane, perdió las manos; la metralla le acribilló el torso al estallarle una bomba que recogía el pasado diciembre. Dos parientes que estaban cerca también resultaron heridos.

Aunque la base de datos de bombardeo se haya utilizado solamente en Laos —el país más devastado por las incursiones aéreas de EE.UU.—, también se dispone de datos para Camboya y Vietnam. Una delegación vietnamita visitó los Estados Unidos el año pasado para tratar sobre el uso de la base de datos.

Ciertos pronósticos sostienen que se tardará años en limpiar Laos de bombas no estalladas. Un asesor del UXO laosiano cita los proyectos de limpieza en Europa, donde todavía se descubren municiones sin explotar desde la Primera Guerra Mundial. Sin embargo, tomando como punto de partida la afanosa investigación histórica de Stanley, tal vez la lucha de Laos contra los fantasmas de la guerra tenga un final más rápido.

Bibliografía complementaria

AFTERMATH: THE REMNANTS OF WAR. Donovan Webster. Vintage Books, 1996.

A HISTORY OF LAOS. Martin Stuart-Fox. Cambridge University Press, 1997.

SHOOTING AT THE MOON: THE STORY OF AMERICA’S CLANDESTINE WAR IN LAOS. Richard Warner. Steerforth Press, South Royalton, Vt., 1997.

GIS AND CULTURAL RESOURCE MANAGEMENT: A MANUAL FOR HERITAGE MANAGERS. Paul Box. UNESCO, 1999.



El progreso de la matemática en los últimos 25 años

J. M. Aroca Hernández-Ros

Los años setenta vieron decaer la tendencia formalista, representada por el grupo Bourbaki, seudónimo de varias generaciones de matemáticos franceses, que escribieron en los decenios centrales del siglo una revisión enciclopédica de la disciplina. Como resultado de esa menor influencia del formalismo, perdió fuerza la idea, repetida hasta la saciedad, según la cual para resolver un problema bastaba plantearlo en el marco adecuado y convertirlo, por ende, en una tautología. Con otras palabras, las matemáticas productoras de teorías cedían el paso a las matemáticas que resuelven problemas.

Pero no podemos olvidar que las teorías desarrolladas durante el apogeo del formalismo aportaron herramientas que permitieron acabar con algunas de las conjeturas más tenaces. Ni podemos dejar de reconocer que, gracias al espíritu unificador de Bourbaki, la mayoría de los profesionales pueden entender los resultados de cualquiera del centenar largo de ramas independientes de las matemáticas y aproximarse al millón de artículos de investigación publicados en el último cuarto de siglo.

Con la incorporación del ordenador llegaron cambios decisivos en los métodos y nacieron nuevas disciplinas matemáticas. La influencia ha sido mutua. "Respecto al ordenador, escribía B. Eckmann en 1994, he oído una y mil veces decir: les guste o no a los matemáticos el ordenador está ahí. Yo no estoy de acuerdo con esta formulación; nos gusta el ordenador y lo usamos. Más, vuelvo la frase por pasiva y respondo que, le guste o no al ordenador, las matemáticas están ahí."

El autor

J. M. AROCA HERNANDEZ-ROS, doctorado por la Universidad Complutense, es catedrático de geometría y topología en la de Valladolid y director del Instituto de Estudios de Iberoamérica y Portugal. Disfrutó de una estancia posdoctoral en Harvard, donde escribió, en colaboración con H. Hironaka (medalla Fields 1974) y J. L. Vicente, la resolución de singularidades de espacios analíticos.

El propio año en que aparece *Investigación y Ciencia* se produce la primera señal del nuevo rumbo con la prueba del teorema de los cuatro colores. No es el único teorema demostrado con el ordenador, aunque sí el más llamativo. Constituye un buen ejemplo de los problemas de planteamiento simple y solución complicada que alcanzan popularidad, como ilustra el lanzamiento de un matasellos conmemorativo en Urbana (Illinois), sede de la Universidad donde se completó la primera prueba.

El problema fue propuesto a Augustus de Morgan por Francis Guthrie, antiguo alumno suyo. Incapaz de resolverlo, de Morgan se lo plantea a William R. Hamilton en carta del 23 de octubre de 1852. "Para colorear —le escribe— un mapa dibujado en una hoja de papel, de modo que países con frontera común se pinten con color diferente, ¿bastan cuatro colores?" Varios matemáticos de la época, Benjamin Peirce y Arthur Cayley entre ellos, se aplicaron sin éxito. En 1879 A. Kempe, que había estudiado con Cayley, publicó una demostración aceptada inicialmente como válida, pero Heawood en 1890 y Charles de la Vallée Poussin en 1896 encontraron errores insalvables en ella.

Desde entonces y hasta 1976 se sucedieron demostraciones parciales. En ese año y con 1200 horas de ordenador, Kenneth Appel y Wolfgang Haken remataron la prueba. Se trataba de la primera demostración que no podía verificarse directamente por ningún matemático, sino sólo por otro programa. Muchos se resistieron a aceptar semejante tipo de demostración. Y aunque el algoritmo de prueba se ha venido refinando, sigue habiendo quienes consideran no probada la conjetura.

El problema de los cuatro colores trasciende su interés histórico. En 1936 Heesch lo replanteó en forma dual. Asignó a cada país una capital y carreteras que la unían con las capitales de los países vecinos. Borró luego las fronteras y obtuvo un grafo equivalente al mapa. De ese modo llevó un problema célebre a un campo en ciernes, el de la teoría de grafos. Los investigadores, interesados por tal vinculación, promovieron el desarrollo de la nueva teoría.

Además de demostrar teoremas, con el ordenador se obtienen aplicaciones valiosas de la matemática

En el postrer cuarto de siglo la matemática ha vivido una época de esplendor. Se han registrado avances espectaculares y se ha producido también un cambio de orientación

clásica. Sin embargo, han sido las matemáticas las que han creado las herramientas básicas necesarias para el ordenador. En una sociedad que depende de la información, se han puesto a punto métodos seguros de transmitirla y almacenarla. Hablamos de la criptografía y la codificación.

De la criptografía al teorema de Fermat-Wiles

Por economía de espacio nos ceñiremos a la criptografía de clave pública y los códigos autocorrectores de errores del matemático ruso N. V. Goppa. Los sistemas criptográficos de clave pública tienen por objeto transmitir la información de modo que sólo pueda ser leída por el destinatario y quede garantizado que sólo puede provenir de quien la firma.

Desde la segunda guerra mundial, cuando la encriptación se apoyaba en la construcción de máquinas mecánicas, así la ajetreada Enigma, los métodos y posibilidades de la criptografía han sufrido una transformación radical. En 1978 aparece el sistema de clave pública de Rivest, Shamir y Adleman (RSA). Así llamado en honor de sus inventores R.L. Rivest, A. Shamir y L. Adleman, este criptosistema se basa en la aritmética modular.

Las matemáticas que intervienen en él son muy simples. Se construyen tres números n, e, d, como sigue: $n = pq$, donde p y q son números primos; se establece la igualdad $f = (p-1)(q-1)$, y se elige un entero e mayor que uno, menor que f y sin divisores comunes con f; por último, con el algoritmo de Euclides de cálculo del máximo común divisor se encuentra un entero positivo d, tal que $de-1$ sea múltiplo de f.

La llave pública del código es la pareja (n,e) y la privada (d). Para enviar un mensaje, éste se reduce primero a una cifra m; el emisor A codifica m, sin más que calcular el resto c de la división de m^e entre n. El destinatario B recibe el mensaje c, y, para leerlo, calcula el resto de dividir c^d por n.

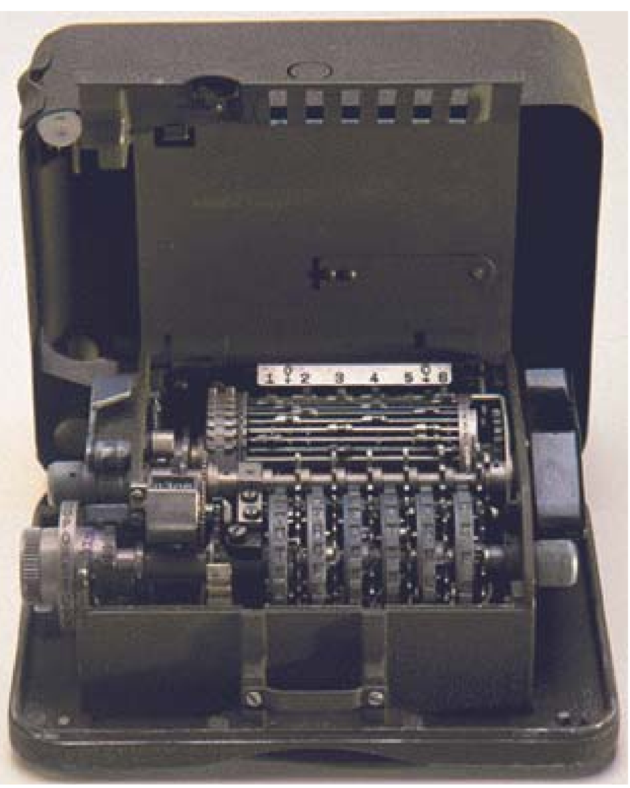
El proceso funciona en virtud de un teorema de Euler que asegura que, si ni p ni q son divisores de m, el resto de dividir m^f entre n es 1. En consecuencia, es también uno el resto de dividir m^{de-1} entre n, ya que $de-1$ es múltiplo de f; por tanto, el resto de dividir c^d por n, el mismo que el de dividir por $n(m^e)^d$, es m. Si podemos factorizar n, que es público, podemos calcular f, y a continuación d. De ese modo descerrajamos el sistema.

El método RSA da lugar a problemas de dos tipos. Consiste el primero en buscar criterios de primalidad que permitan calcular grandes números primos p y q. Así se obtienen números $n = pq$ difíciles de factorizar (objetivo de los constructores de códigos). El segundo tipo estriba en desarrollar métodos para la factorización de números grandes (meta de los destructores de códigos).

La carrera entre productores de grandes primos y factorizadores ha traído avances notables en teoría de números y en algoritmos de computación, que han repercutido en los cálculos. El número dado por no factorizable en el artículo inicial de RSA de 1976, cuando se consideraban precisos 4×10^{16} años de ordenador para descomponerlo, se factorizó en 8 meses con ayuda de 1600 ordenadores trabajando en paralelo por el grupo liderado por Arjen Lenstra, cuyos métodos de factorización constituyen uno de los hitos de las matemáticas recientes. Hoy, el ordenador cuántico inclinaría del lado de los factorizadores la competición.

1. EL AÑO EN QUE APARECE *Investigación y Ciencia* se produce la primera señal del nuevo rumbo tomado por la matemática con la prueba del teorema de los cuatro colores. No es el único teorema demostrado con el ordenador. Constituye un buen ejemplo de los problemas de planteamiento simple y solución complicada que alcanzan popularidad, como ilustra el lanzamiento de un matasellos conmemorativo en Urbana (Illinois).





2. DESDE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL, cuando la encriptación se apoyaba en la construcción de máquinas mecánicas, así la ajetreada Enigma (*izquierda*) y la Hagelin (*derecha*), los métodos y posibilidades de la criptografía han sufrido una transformación radical. En 1978 aparece el sistema de clave pública de Rivest, Shamir y Adleman (RSA) que se basa en la aritmética modular.

En ciertos métodos de primalidad y factorización desempeñan un papel principal las curvas algebraicas planas, y en particular las elípticas, sobre cuerpos finitos. (Las curvas algebraicas planas son curvas descritas por una ecuación polinómica en dos variables; las elípticas son las de ecuación del tipo $y^2 = x^3 + ax + b$.) En la teoría de curvas algebraicas sobre cuerpos finitos se funda un método de construcción de códigos correctores de errores debido a Goppa, que ha supuesto un punto de inflexión tanto en el desarrollo de una parte de la geometría algebraica como en teoría de la información.

En los años cuarenta R. Hamming ideó los códigos correctores de errores. Diseñó un método para añadir, a cada bloque de información, más información redundante (por ejemplo, la letra agregada al final del número del documento nacional de identidad), que permitiera detectar y reparar pequeños errores producidos por una transmisión deficiente o por "ruidos".

La idea de Hamming tuvo éxito inmediato. En su estela se crearon muchos métodos de codificación correctora de errores. Se difundieron bastante los de Reed y Solomon, que emplean, por bloques del código, los valores de todos los polinomios de grado menor que un número dado. Los polinomios se toman con coeficientes en un cuerpo finito y se evalúan en los números de ese cuerpo, considerados en un cierto orden. Presenta su talón de Aquiles en la escasez de tales códigos y en el tamaño de sus bloques, que está limitado por el número de elementos del cuerpo.

En 1981 Goppa sugirió sustituir la estructura de cuerpo por una curva algebraica y, la evaluación de polinomios, por la de funciones algebraicas sobre puntos de curvas. Pudo así ampliarse el tamaño de los bloques buscando curvas con muchos puntos. Aunque Goppa propuso curvas lisas, ahora se trabaja con curvas singulares. Drinfeld (medalla Fields en 1990) y Vladut han dado una cota superior muy ajustada del número de puntos de curvas definidas sobre cuerpos de p^{2n} elementos. (La medalla Fields es el máximo galardón concedido en matemáticas.)

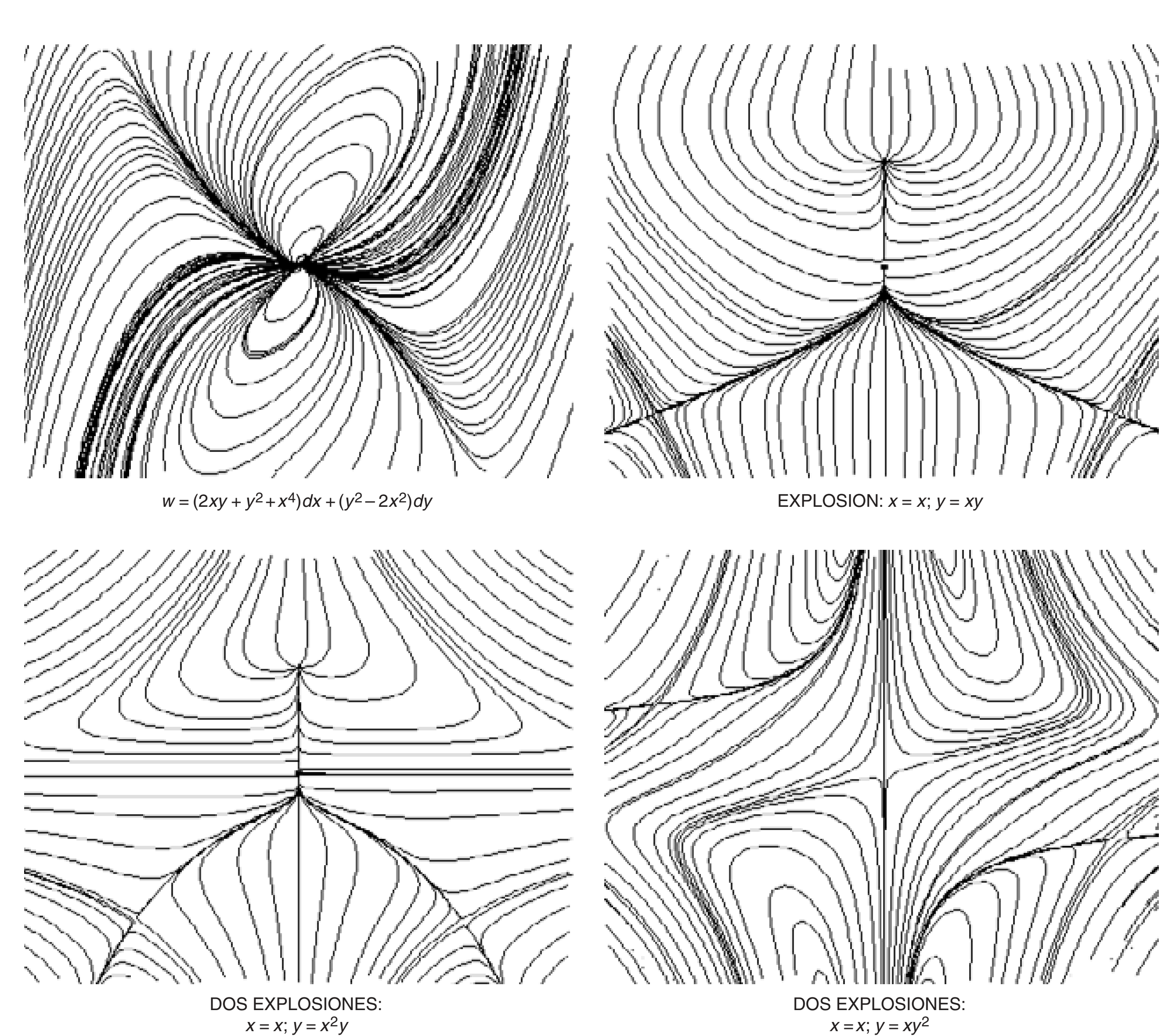
El progreso experimentado por la teoría de curvas algebraicas no se alimentó sólo con la teoría de códigos. G. Faltings recibió la medalla Fields por su prueba en 1983 de la conjetura de Mordell, según la cual "toda curva de género mayor que uno definida

sobre un cuerpo de números K, tiene un número finito de puntos con valores en K".

Si nos atenemos al cuerpo de los números racionales, el resultado probado por Faltings nos enseña que toda ecuación polinómica, en dos variables con coeficientes racionales, que represente una curva de género mayor que uno tiene sólo un número finito de soluciones racionales. La necesidad de la condición sobre el género es fácil de entender; una recta $y - x = 0$ por ejemplo, o una circunferencia $x^2 + y^2 - 1 = 0$, tienen infinitos puntos racionales y deben ser excluidos del enunciado. Un ejemplo bien conocido incluido en la conjetura es el de la ecuación de Fermat: $x^n + y^n = z^n$ $(n > 2)$; cada solución entera de esta ecuación con $z \neq 0$ da una solución racional de la ecuación: $(x/z)^n + (y/z)^n = 1$. Del resultado de Faltings se desprende que la ecuación de Fermat (para $n > 2$) tiene a lo más un número finito de soluciones.

En 1993 A. Wiles demostró el último teorema de Fermat. Había en su primera prueba un paso en falso, reconocido por el propio Wiles a fines de ese mismo año. Corregido por fin en octubre de 1994, con la colaboración de R. Taylor, se obtuvo la demostración completa del famoso teorema.

El decurso de la demostración pasa por relacionarlo con una conjetura general de Taniyama, Shimura y Weil (en honor de Y. Taniyama, S. Shimura y André Weil) y probar una versión particular de la misma. La conjetura en cuestión vincula dos dominios de las matemáticas que aparentan hallarse muy alejados entre sí: las curvas elípticas y las formas modulares (funciones analíticas sobre el semi-



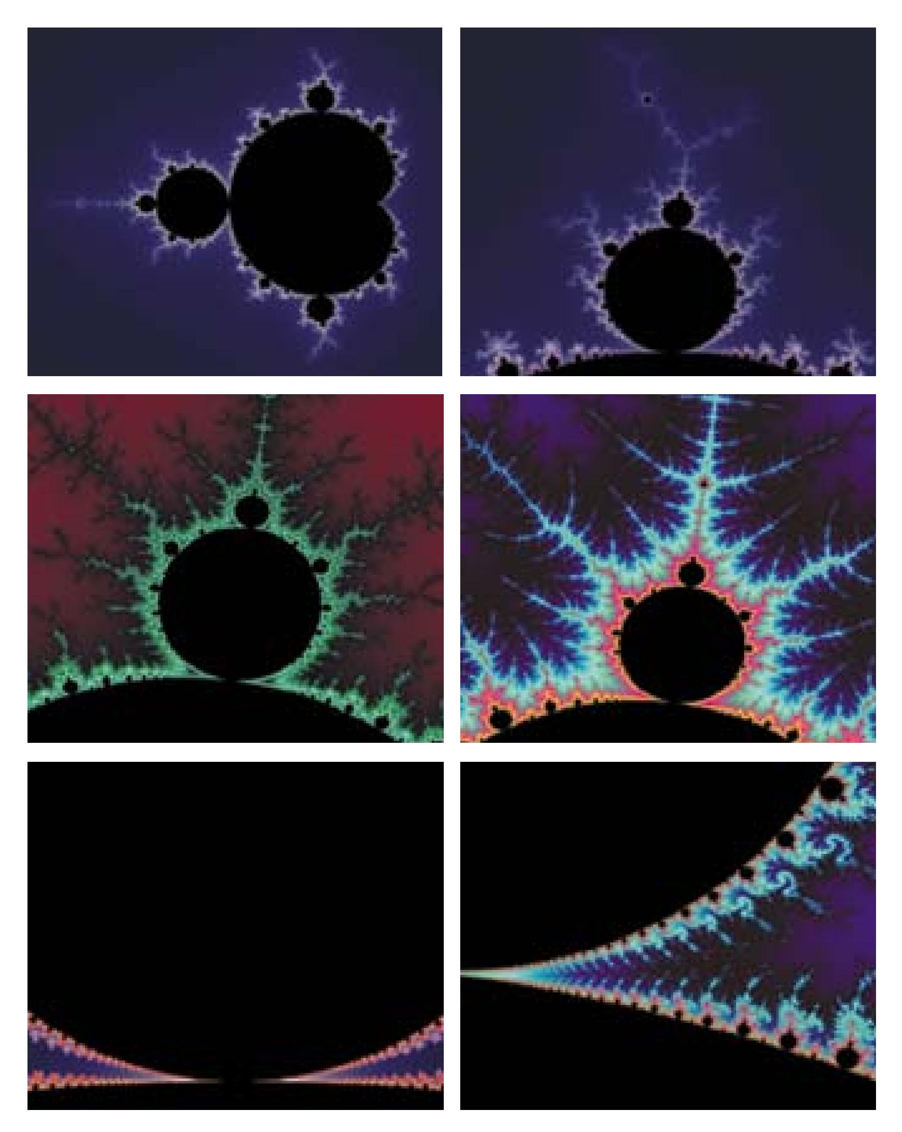
$w = (2xy + y^2 + x^4)dx + (y^2 - 2x^2)dy$

EXPLOSION: $x = x$; $y = xy$

DOS EXPLOSIONES: $x = x$; $y = x^2y$

DOS EXPLOSIONES: $x = x$; $y = xy^2$

3. CON UNA TRANSFORMACION ALGEBRAICA llamada explosión, podemos substituir un punto del plano por una recta proyectiva de puntos (una recta con un único infinito, es decir, una circunferencia en el plano real y una esfera en el plano complejo); cada punto corresponde a una recta por el origen. De acuerdo con el teorema de Seidenberg, un campo con una singularidad puede transformarse en otro no singular o con singularidades bien conocidas mediante la aplicación de un número finito de explosiones.



4. LA DINAMICA COMPLEJA UNIDIMENSIONAL es el estudio de las estructuras iteradas como aplicación de un polinomio complejo de grado mayor o igual de dos. Comenzada a investigar a principios de siglo, se ha convertido en los últimos 25 años en una de las estrellas de la matemática debido al giro espectacular que la obra de Benoit Mandelbrot confirió a la teoría.

plano de Poincaré con condiciones de crecimiento en el borde y verificando cierta ecuación funcional). Gracias a los resultados de Wiles, en el año 2000 Breuil, Conrad, Diamond y Taylor acabaron demostrando la conjetura.

Contra lo que opinaba Karl F. Gauss, ha quedado patente que el teorema de Fermat-Wiles no es una proposición sobre números cuya verdad o falsedad pueda afirmarse arbitrariamente, sino que se trata de un teorema ligado a propiedades fundamentales de los números.

Caídas en este último cuarto de siglo las conjeturas de Fermat y Mordell, no deben desesperar los aficionados a los números. Quedan todavía algunas conjeturas de fácil planteamiento, gran renombre y larga historia. Recuérdense la conjetura de Goldbach (en honor de Christian Goldbach, afirma que todo entero mayor que dos es suma de dos primos), la de los primos gemelos —existe una infinidad de pares de números primos (p,q) con $q - p = 2$— o la de Catalan (en honor de Eugène Charles Catalan, afirma que las únicas potencias de enteros consecutivas son 8 y 9).

A esa gavilla clásica, podríamos añadir algunas más recientes y anecdóticas, como la siguiente: si partimos de un número entero positivo n y lo dividimos por 2 en caso de que sea par o lo multiplicamos por 3 y le sumamos 1 en el caso de que sea impar, e iteramos el proceso, al cabo de un número finito de pasos e llega a 1 (problema de Syracusa).

De la dinámica al caos

En el postrer cuarto de siglo se han cosechado también avances de interés en el campo de las ecuaciones diferenciales. El estudio de sistemas dinámicos y evolutivos (físicos, biológicos, económicos, etc.) conduce de modo natural a las ecuaciones diferenciales. Una vez establecido el modelo matemático asociado a un fenómeno, se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales. Pensar en resolverlo, en el sentido de dar una descripción completa de sus soluciones, es utópico. No obstante, cabe, a veces, una resolución parcial y, en otras, se puede extraer información directa a partir del problema que motivó la ecuación.

El primero que subrayó la complejidad de las ecuaciones diferenciales de segundo orden en una variable, las más simples de cuantas encierran un significado físico de interés, fue Joseph Liouville. Observó que, entre las ecuaciones integrales lineales, había unas integrables y otras no, entendiendo por integrabilidad la posibilidad de resolver la ecuación en términos de una lista de funciones bien conocidas.

Precisamente el sueño de Marius Sophus Lie fue la transposición de la teoría algebraica de Evariste Galois a las ecuaciones diferenciales. En concreto, se proponía hallar criterios de integrabilidad por medio de un grupo de simetrías de la ecuación. Dada una ecuación diferencial lineal: $y^{(n)} + a_{n-1}(x)\, y^{(n-1)} + ... + a_0(x)\, y = 0$ cuyos coeficientes son funciones racionales, se llama singularidades de la ecuación a los polos de los coeficientes, es decir, a los ceros de sus denominadores (y eventualmente a infinito si en alguno de ellos el grado del numerador es mayor que el del denominador). Se llaman así porque en un entorno de

un punto no singular las soluciones de la ecuación son funciones analíticas (de hecho hay un espacio vectorial de dimensión n sobre los complejos de soluciones) que no se pueden prolongar analíticamente a las singularidades.

Si tomamos un lazo (camino cerrado) en la recta compleja con base en un punto P no singular y que no pasa por ningún punto singular, y prolongamos analíticamente una solución a lo largo del camino, al volver a P llegamos a otra solución, que en general no es la misma que la inicial. Tenemos así una aplicación lineal del espacio vectorial de soluciones en P en sí mismo, o, fijando una base de este espacio, una matriz regular, que se llama la monodromía asociada al camino.

Si deformamos continuamente un lazo para obtener otro, sin pasar en la deformación por ningún punto singular, la monodromía no cambia. Por tanto la monodromía define una aplicación del grupo de clases de lazos módulo deformación (grupo de Poincaré), del complementario del conjunto de singularidades de la ecuación, en el grupo de matrices regulares de orden n. Esta aplicación se llama monodromía de la ecuación.

Fuchs demostró en 1867 que si las matrices de monodromía de una ecuación son simultáneamente diagonalizables, entonces las soluciones se pueden prolongar a los puntos singulares con puntos de ramificación y ramas logarítmicas (estas singularidades se llaman regulares) y dio un criterio para que todas las singularidades fueran regulares. E. Picard y E. Vessiot definieron a finales del siglo XIX, siguiendo el método desarrollado por E. Galois para ecuaciones algebraicas, un grupo de Galois para ecuaciones diferenciales lineales que contiene al grupo de monodromía.

Desde ese momento se suceden en cadena los éxitos en ecuaciones lineales: creación del análisis funcional, aplicaciones del álgebra no conmutativa vía la teoría de módulos sobre anillos de operadores diferenciales, trabajos de P. Deligne sobre el problema de Riemann-Hilbert ("existe siempre una ecuación diferencial lineal con singularidades preestablecidas y un grupo de monodromía prescrito") y estudios de B. Malgrange y J. P. Ramis sobre singularidades irregulares.

La no integrabilidad de algunas ecuaciones no lineales provenientes de problemas físicos se reconoce a partir de la versión lineal de aquéllas. En 1999 Ramis y los matemáticos españoles Carlos Simó y J. Morales caracterizaron la integrabilidad completa de los sistemas clásicos o hamiltonianos.

Con anterioridad, los intentos de caracterizar la integrabilidad, realizados por Henri Poincaré, Sofia Kovalevskaya y V. Arnold, pasaban por probar la regularidad de la monodromía de la ecuación variacional inducida a lo largo de una curva integral. Como esta monodromía refleja la integrabilidad sólo en singularidades regulares, se había llegado a un callejón sin salida. Para deshacer tal aporía, Morales, Ramis y Simó han sustituido el grupo de monodromía por el grupo de Galois diferencial, que funciona incluso para singularidades irregulares. Han obtenido así un criterio de integrabilidad aplicable a numerosos problemas de la física.

Para ecuaciones diferenciales no lineales, la situación difiere de la del caso lineal y el análogo a la teoría de Galois existe sólo en casos muy particulares. En el caso de una ecuación diferencial compleja de primer orden y primer grado: $a(x,y)\ y' + b(x,y) = 0$, se llama puntos singulares a los puntos donde se anulan los dos coeficientes simultáneamente. Fuera de los puntos singulares, un resultado de Frobenius asegura que las soluciones admiten localmente (para un cierto sistema de coordenadas) la expresión $y = cte$, formando así una foliación; las soluciones se llaman hojas.

Tomando un sistema adecuado de coordenadas se puede elegir una recta $x = x_0$ en el plano (x,y) transversal a las hojas y que no pase por ningún punto singular. Entonces, por cada punto P de la transversal pasa una hoja H de la foliación, y un lazo basado en x_0 que no pase por la proyección de ninguna singularidad se eleva a H con origen en P y su extremo es otro punto de la transversal. Así tenemos una aplicación de la transversal en sí misma que se llama la homonimia del camino. Dos caminos que difieren en una deformación dan lugar a la misma homonimia y la imagen del grupo de Poincaré se llama grupo de holonomía de la ecuación. La existencia de integrales primeras y la integrabilidad se han caracterizado en términos de holonomía en los años ochenta.

Por lo que se refiere a resolución de ecuaciones de interés en física, desde finales del pasado siglo se han ideado soluciones en puntos no singulares. (Los puntos singulares son aquellos en que se anula el sistema.) Para sistemas dinámicos en particular, debemos a Poincaré la idea de describir objetos especiales en torno a los cuales se organiza la dinámica. Las soluciones de sistemas dinámicos se estructuran en torno a variedades invariantes o separatrices, cuya búsqueda y estudio se inicia a mediados del siglo XIX con Charles Briot y J. Bouquet.

La conjetura de Thom

René Thom actualiza, avanzado el siglo XX, el problema conjeturando la existencia de hipersuperficies integrales de foliaciones analíticas complejas de codimensión uno en cualquier dimensión. La conjetura de Thom para foliaciones del plano por curvas planas (sistemas dinámicos del plano complejo o ecuaciones diferenciales ordinarias analíticas complejas de orden y grado uno) fue demostrada en 1982 por C. Camacho y P. Sad. Probaron la existencia de soluciones analíticas en los puntos singulares, apoyados en un proceso de reducción de singularidades ideado por A. Seidenberg. Logra éste una traslación a ecuaciones diferenciales de resultados clásicos de geometría algebraica que tenían una historia centenaria, y en los que habían intervenido desde Emmy Noether hasta O. Zariski y H. Hironaka.

Un campo de vectores presenta una singularidad en un punto, cuando, por continuidad, debería asignar a ese punto vectores de direcciones distintas y,

al no poder hacerlo, debe anularse en él. Pero con una transformación algebraica llamada explosión, podemos sustituir un punto del plano por una recta proyectiva de puntos (una recta con un único infinito, es decir, una circunferencia en el plano real y una esfera en el plano complejo); cada punto corresponde a una recta por el origen. De acuerdo con el teorema de Seidenberg, un campo con una singularidad puede transformarse en otro no singular o con singularidades bien conocidas mediante la aplicación de un número finito de explosiones.

Apoyándose en el trabajo de Gaston Darboux sobre soluciones singulares de ecuaciones diferenciales de primer orden, publicado en 1873, S. P. Jouanoulou aportó en 1979 un contraejemplo de la conjetura de Thom en dimensión tres. Pero el matemático español F. Cano mostró en 1991 que ese contraejemplo correspondía a una situación especial (dicrítica) y probó un teorema de reducción de singularidades para formas diferenciales analíticas complejas en dimensión tres. Un año después, en colaboración con D. Cerveau, Cano se sirvió de ese resultado para probar la conjetura de Thom en dimensión tres por medio de secciones tridimensionales. Siguiendo ideas desarrolladas por J. F. Mattei y R. Moussu, probó en colaboración con Mattei la conjetura de Thom en el caso general.

A Thom se le debe también, ahora en el ámbito de las ecuaciones diferenciales sobre el cuerpo real, la conjetura del gradiente. A tenor de la misma, dada una función analítica (potencial) en un espacio euclídeo, si las trayectorias de su campo gradiente se acumulan en un punto, llegan a él con tangente bien definida.

S. Lojasievicz probó que las trayectorias del gradiente tienen longitud finita y se acumulan, por tanto, en torno a un punto. En 1999, Kurdyka Parusinski y Mostowski demostraron finalmente la conjetura del gradiente de Thom. No obstante aún sobrevive una forma fuerte de la misma, establecida por Moussu; afirma que la trayectoria no sólo no gira en espiral indefinidamente, según postulaba Thom, sino que tampoco oscila infinitamente.

El problema fundamental —y el más inaccesible, junto con la hipótesis de Riemann— de los propuestos por Hilbert en 1900 de las ecuaciones diferenciales reales es la segunda parte del problema 16 de Hilbert: “El número de ciclos límite de una ecuación de primer orden y primer grado con coeficientes polinómicos se puede acotar en términos del máximo de los grados de los coeficientes.” La versión de Dulac, más débil, requiere probar que sólo hay un número finito de ciclos límite. Fue resuelta independientemente por J. Ecalle e Il’yachenko en los primeros años noventa, aunque ninguna de las dos pruebas satisface a todos los matemáticos.

Atractores y repulsores

La dinámica compleja unidimensional es el estudio de las iteradas como aplicación de un polinomio complejo de grado mayor o igual de dos, y es, según Stephen Smale, la parte más avanzada y técnica de la dinámica. Se ha convertido en los últimos 25 años en una de las estrellas de la matemática debido al giro espectacular que la obra de Benoit Mandelbrot confirió a la teoría.

Nos encontramos ante un caso particular de la teoría de sistemas dinámicos discretos, es decir, del estudio de las iteradas de una aplicación continua de un subconjunto del espacio euclídeo de cualquier dimensión en sí mismo. Si $f(z)$ es una aplicación de un subconjunto $\mathbf{D}$ del conjunto $\mathbf{R}^n$ de los números reales en sí mismo, cabe iterarla del modo siguiente. Sea $f^n(\mathbf{z}) = f(f(....f(\mathbf{z})))$. Si $f(\mathbf{w}) = \mathbf{w}$, se dice que w es un punto fijo de f y si $f^n(\mathbf{w}) = \mathbf{w}$, con $n > 1$, se dice que $\mathbf{w}$ es un punto periódico de f. Al mínimo $\mathbf{n}$ con la propiedad anterior se le conoce por período de $\mathbf{w}$. En general se llama a $\{\mathbf{z}, f(\mathbf{z}) \ldots f^n(\mathbf{z}) .....\}$ la órbita de $\mathbf{z}$, que será finita si $\mathbf{z}$ es periódico. Sin más que apoyar el dedo en la tecla correspondiente de la calculadora, se obtiene que cualquiera que sea el ángulo z, la órbita de z por la función coseno se acumula en 0,739..., este número se llama un atractor para el coseno. Más generalmente, las órbitas de los puntos de un conjunto V se pueden acumular en torno a un subconjunto F de V, invariante por f; el conjunto F se llama entonces un atractor con dominio de atracción V. Pero si los puntos de V que no están en F se alejan de F por la aplicación reiterada de f, el conjunto se llama repulsor.

En el caso particular de las funciones analíticas de una variable compleja, en los polinomios de una manera especial, se pueden estudiar algunos atractores y repulsores. Si w es un punto periódico de período p de una función analítica de una variable compleja f y la derivada en w de $f^n(z)$ es el complejo a, el punto w se llama repelente si $|a| > 1$.

En homenaje a su creador Gaston Julia, se denomina conjunto de Julia de f al cierre $J(f)$ del conjunto de puntos repelentes de f. Sea, por ejemplo, $f(z) = z^2$; entonces, los puntos periódicos de f de período p se corresponden con las raíces primitivas de la unidad de orden $2p$ y todos son repelentes. En consecuencia, $J(f)$ es la circunferencia unidad y es un repulsor en cualquier corona circular que lo contenga. $J(f)$ es la frontera de separación entre los puntos cuya órbita se acumula en cero y aquellos cuya órbita se va a infinito.

Podemos estudiar los conjuntos de Julia para polinomios de la forma $f_c(z) = z^2 + c$. Se llama conjunto de Mandelbrot al conjunto de valores c para los cuales $J(f_c)$ es conexo; es decir, los complejos c que verifican que la órbita de cero por f_c está acotada. Puesto que el conjunto de los complejos se identifica con el plano real, con ayuda de un ordenador se pueden hacer dibujos del conjunto de Mandelbrot. Este conjunto es uno de los ejemplos más populares de los fractales. A. Douady ha probado que es conexo.

El término fractal (del latín *fractus*, roto) fue acuñado por Mandelbrot para describir una clase de conjuntos que, a la manera del perfil de la costa bretona, eran muy irregulares. En su descripción formal, los fractales son espacios topológicos cuya dimensión de Hausdorff (dimensión conjuntista así llamada en ho-

nor de Felix Hausdorff) es mayor que su dimensión topológica. De un modo más intuitivo, los fractales son conjuntos definidos en general de forma recursiva, muy irregulares para recibir una descripción local o globalmente en términos geométricos y con autosimetría interna que hace que el todo se asemeje a algunas de sus partes.

La investigación de los fractales ha obtenido resultados espectaculares en dos áreas sobre todo, a saber, en la densidad de los polinomios hiperbólicos y en los atractores extraños. Un polinomio complejo de una variable se llama hiperbólico si las órbitas de sus puntos críticos (puntos de anulación de la derivada compleja) tienden a un ciclo atractor. En la cuestión planteada por Smale —"¿Se puede aproximar cualquier polinomio complejo por polinomios hiperbólicos de su mismo grado?"— se cifra el problema central de la dinámica compleja de dimensión uno. El problema está abierto incluso para grado $d = 2$.



5. LOS FRACTALES son espacios topológicos cuya dimensión de Hausdorff es mayor que su dimensión topológica. De un modo más intuitivo, los fractales son conjuntos definidos en general de forma recursiva, muy irregulares para recibir una descripción local o globalmente en términos geométricos y con autosimetría interna.

C. T. McMullen (medalla Fields en 1998) ha dado una caracterización dinámica de los polinomios hiperbólicos de grado dos. Para los polinomios cuadráticos: $f_c(z) = z^2 + c$, con parámetro c, el único punto crítico es 0. Si, por iteración, éste se aproxima a infinito, la dinámica no entraña ninguna dificultad. En caso contrario, c está en el conjunto de Mandelbrot; si c se halla en una componente del interior del Mandelbrot que corte al eje real, el polinomio es hiperbólico.

Pero, "¿se pueden aproximar difeomorfismos de una variedad compacta por difeomorfismos que conmuten solamente con sus iterados?", pregunta Smale, generalizando el problema. Se tiende así a establecer que la dinámica es casi siempre de tipo hiperbólico o cuasiperiódico. En ese terreno J. C. Yoccoz (medalla Fields en 1994) logró resultados importantes, entre otros, el desarrollo de un sistema para el estudio del Mandelbrot, los famosos rompecabezas de Yoccoz.

Los atractores extraños están ligados a los fractales y a otra novedad no menos sugestiva, la teoría del caos. En los años sesenta, Edward Lorenz, empeñado en idear un modelo simple del comportamiento de la atmósfera, redescubrió un fenómeno ya conocido por Poincaré: la sensibilidad de determinadas ecuaciones diferenciales a las condiciones iniciales de las soluciones. En efecto, las variaciones de las condiciones iniciales se reflejaban exponencialmente en las soluciones de las ecuaciones.

Ello implicaba que, si varias ecuaciones se acoplan utilizándose las soluciones de cada una como condiciones iniciales de la siguiente, los errores se disparan. Lo que impide predecir el comportamiento de un fenómeno regido por un sistema de ecuaciones acopladas sensibles a las condiciones iniciales. Puesto que las condiciones iniciales se conocen sólo con cierta aproximación, el error crece exponencialmente al pasar a las soluciones de la primera ecuación, que se toman como condiciones iniciales de la segunda, y así con las ecuaciones subsiguientes. Basta un conjunto de tres ecuaciones no lineales de primer orden acopladas para engendrar trayectorias de comportamiento caótico (el célebre efecto mariposa).

Asociado a este fenómeno Lorenz probó por vía numérica la existencia de un atractor extraño, un atractor fractal. Aunque se conocen atractores extraños ligados a sistemas discretos, muchos matemáticos les niegan su existencia en sistemas diferenciales y atribuyen la aparición del atractor de Lorenz al cálculo numérico utilizado. No obstante, parece ser que W. Tucker acaba de demostrar la existencia del atractor de Lorenz gracias a las posibilidades de los nuevos métodos de cálculo.

Las conjeturas de Bieberbach y Banach

No sólo se han obtenido resultados interesantes en funciones analíticas de una variable compleja estudiando las iteraciones. Otros problemas clásicos resueltos han sido las conjeturas de Bieberbach y Banach. Se parte de Georg F. B. Riemann, matemático alemán que murió de tuberculosis en 1866 a los 39 años. Establece cierto teorema de Riemann que toda región simplemente conexa de la recta compleja es



6. LOS ATRACTORES EXTRAÑOS están ligados a los fractales y a la teoría del caos. En los años sesenta, Edward Lorenz, empeñado en idear un modelo simple del comportamiento de la atmósfera, redescubrió un fenómeno ya conocido por Poincaré: la sensibilidad de determinadas ecuaciones diferenciales a las condiciones iniciales de las soluciones.

imagen del disco unidad por una función analítica inyectiva (aplicación de Riemann). Su creador probó el teorema por medio de un argumento de aproximación que utiliza la posibilidad de estimar estas funciones por sus valores y los de su derivada en el origen. Un proceso de normalización permite suponer que la aplicación de Riemann vale cero en el origen (o sea, el origen es un punto fijo) y que la derivada es real positiva. En este caso la aplicación se halla unívocamente determinada por la región imagen.

L. Bieberbach había propuesto en 1916 la conjetura que lleva su nombre. De acuerdo con la conjetura de Bieberbach, para una aplicación de Riemann: $f(z) = a_1z + a_2z^2 + ...$ necesariamente $|a_n| \leq na_1$ para todo n. En la resolución de la misma trabajaron numerosos matemáticos a lo largo de 70 años. En 1972 se había llegado hasta acotar los seis primeros coeficientes, con métodos específicos y esencialmente distintos para cada uno de ellos. L. de Branges en 1984 probó, con ayuda de W. Gautschi, el resultado general.

Contemporáneo de Bieberbach, Stefan Banach es progenitor de varios teoremas de análisis funcional e introductor de los espacios lineales normalizados (espacios de Banach). La relación existente entre los espacios y las funciones sobre ellos tiende un puente entre la geometría y el análisis. Desde sus mismos orígenes, el análisis funcional se ha esforzado por entender la conexión entre un espacio de Banach y el álgebra de operadores acotados sobre él, así como la relación entre la existencia de buenos subespacios y una mayor riqueza en la estructura del álgebra de operadores.

Sin embargo, hasta los años ochenta la situación estaba estancada. Debemos a T. Gowers (medalla Fields de 1998) los principales logros en superar la mayoría de los puntos de atasco de la teoría. Una de las claves de su trabajo fue la prueba en 1991 del llamado teorema de dicotomía, punto de partida de mucho del análisis funcional actual. Gowers dio fin a dos conjeturas célebres de Banach, la del hiperplano (existe un espacio de Banach con base incondicional no isomorfo a ninguno de sus hiperplanos) y la que establece que el espacio de Hilbert l_2 es el único espacio de Hilbert homogéneo, es decir, isomorfo a todos sus subespacios.

Geometría y física, dos caras de una moneda

A lo largo del postrer cuarto de siglo uno de los temas estrella de las matemáticas ha sido la geometría de baja dimensión. Los objetos básicos de la geometría son los espacios topológicos; para ser más precisos, las variedades topológicas. Por éstas se entienden los espacios cuya estructura local es la de un espacio euclídeo. La adición a una de estas variedades de funciones convenientes proporciona los distintos tipos de geometría, diferencial, analítica real, etc. Las variedades se pueden clasificar topológica, diferenciable o analíticamente. Aunque se trata de una metáfora, podemos pensar que una hoja de papel lisa y otra arrugada son topológicamente equivalentes, siempre que al arrugarla no hagamos agujeros o rompamos la hoja. Una deformación suave, sin ángulos bruscos, correspondería a la equivalencia diferenciable.

La imprecisión de esa idea intuitiva se comprueba sin más que observar que ya en 1958 J. Milnor descubrió las esferas exóticas en dimensión 7, es decir, la existencia de dos estructuras diferenciales no equivalentes sobre la esfera del espacio de dimensión 8. Desde el siglo XIX se conocían perfectamente las superficies (variedades de dimensión 2). Smale y Milnor empezaron a abordar las variedades diferenciales de dimensión mayor que 4. A mediados de los setenta, quedaban solamente las dimensiones 3 y 4 que, según señala Michael Atiyah, son totalmente distintas, más sutiles e intrincadas que las de dimensión mayor.

Pese a vivir en un espacio tridimensional, no es fácil entender intuitivamente las variedades de dimensión tres. Dificultad que empieza con la comprensión de la esfera tridimensional, en teoría la 3-variedad más sencilla. Aunque podemos describir la 3-esfera como el conjunto de los puntos (x, y, z, t) del espacio real de dimensión 4 que verifican la ecuación: $x^2 + y^2 + z^2 + t^2 = 1$, no extraemos de ello una idea de su forma.

Un método topológicamente más adecuado es considerar la esfera de dimensión 0, es decir, los puntos +1 y –1 en la recta. Estos puntos limitan la bola de dimensión uno, que es el segmento de extremos +1 y –1. Pegando por su borde dos bolas de dimensión uno, esto es, el +1 de la primera con el de la se-

gunda y lo mismo el –1, se obtiene con una pequeña deformación una circunferencia, que limita el círculo o bola de dimensión dos. Adhiriendo dos círculos por su borde se obtiene una esfera que encierra una bola de dimensión tres; pegando dos bolas por su borde se obtiene la esfera tridimensional. La 3-esfera será, pues, conexa, cerrada, acotada (o compacta en términos topológicos) y simplemente conexa (cualquier lazo trazado sobre ella puede contraerse hasta cerrarlo en un punto). Poincaré conjeturó ya que estas propiedades caracterizaban a la esfera tridimensional. En síntesis, toda variedad tridimensional conexa, compacta y simplemente conexa es homeomorfa (topológicamente equivalente) a la esfera.

La conjetura de Poincaré adquiere una generalización natural con el siguiente enunciado: "Toda variedad topológica con los mismos invariantes (homología y grupo fundamental) de una esfera de dimensión n es homeomorfa a ella." La respuesta afirmativa a esta conjetura para $n = 1$ o $n = 2$ era bien conocida en el siglo XIX. Para n mayor o igual que 5 la conjetura fue probada en los sesenta por Smale. En 1982 M. H. Freedman (medalla Fields de 1986) probó la conjetura para $n = 4$. Más aún, proporcionó una clasificación completa de las variedades topológicas de dimensión 4 compactas y simplemente conexas por medio de dos invariantes. Uno de ellos se obtiene usando una matriz entera simétrica de determinante más o menos uno, dada por la intersección de ciclos en el grupo de homología de dimensión 2.

Queda por demostrar, sin embargo, la conjetura de Poincaré en su formulación inicial, es decir, para la 3-esfera. El matemático español J. M. Montesinos ha logrado interesantes resultados en ese campo, así como una conjetura que generaliza la de Poincaré.

Con un trabajo espléndido sobre variedades diferenciales de dimensión tres, grupos kleinianos y geometría hiperbólica, publicado en 1982, W. P. Thurston se hizo merecedor de la medalla Fields de ese año. El artículo en cuestión revolucionó la geometría en baja dimensión. La topología tridimensional retornaba a la corriente principal de las matemáticas.

Thurston abordaba el caso tridimensional como un análogo al bidimensional, suponiendo que una clase muy amplia de variedades tridimensionales admiten una estructura hiperbólica. Es decir, son cocientes del espacio hiperbólico por grupos discretos de isometrías; o lo que es lo mismo, admiten una métrica de curvatura constante negativa. La prueba de esta conjetura para la clase de variedades de Haken le permitió dar un teorema de estructura para las variedades diferenciales compactas en dimensión 3.



7. SIENDO ALUMNO DE DOCTORADO S. Donaldson (medalla Fields en 1986) estableció la existencia de espacios exóticos de dimensión 4, es decir, variedades topológicas de dimensión 4 homeomorfas al espacio euclídeo tetradimensional.

Siendo todavía alumno de doctorado S. Donaldson probó un resultado que, junto a otros obtenidos de Freedman, establece la existencia de espacios exóticos de dimensión 4, es decir, variedades topológicas de dimensión 4 homeomorfas al espacio euclídeo tetradimensional. Hay dos aspectos sorprendentes en el resultado. Era conocido que estos espacios sólo pueden existir en dimensión 4 y se dudaba de su existencia, y en estos espacios hay conjuntos compactos no contenidos en ninguna esfera sumergida diferenciablemente. Tales resultados, anecdóticos, no deben velarnos la observación central de Donaldson según la cual, para las variedades diferenciales orientadas, sólo pueden presentarse determinadas matrices de las obtenidas como invariantes por Freedman. De lo que se deduce la distinción entre la situación topológica y la diferenciable.

Ahora bien, lo más sorprendente no fueron los resultados de Donaldson, sino sus métodos, completamente nuevos y extraídos de la física teórica. Estos se basaron en las ecuaciones de Yang-Mills, generalización no lineal de las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell. Estas ecuaciones aparecen como las ecuaciones variacionales asociadas a la L_2-norma de la curvatura en fibrados. Si el grupo estructural del fibrado es la circunferencia, se obtienen las ecuaciones de Maxwell; si es un grupo no abeliano se tiene una teoría no lineal. Donaldson utiliza el grupo SU(2).

Los físicos se interesan por las ecuaciones de Yang-Mills sobre el espacio de Minkowski (así llamado en honor de Hermann Minkowski) cuando son hiperbólicas y sobre el espacio euclídeo cuando son elípticas. En el caso euclídeo los mínimos absolutos del problema variacional son los instantones, estudiados por M. Atiyah y clasificados por Yu I. Manin y V. Drinfeld. Donaldson revierte el proceso y usa los instantones sobre variedades de dimensión cuatro como una herramienta geométrica. Además, relaciona los instantones con fibrados algebraicos sobe el plano proyectivo complejo considerado como compactificación de $\mathbf{R}^4$.

La vía abierta por Donaldson hace que muchos físicos consigan resultados importantes en matemáticas. El mejor ejemplo es Edward Witten (medalla Fields en 1990). Una buena parte de la obra de Witten gira en torno al operador

de Dirac y a la integral de Feynman, herramientas esenciales de la física cuántica, pero difíciles de definir desde un punto de vista matemático formal.

Entre los principales resultados obtenidos por Witten señalaremos su prueba de la conjetura de la positividad de la masa. Esta conjetura, demostrada en un comienzo por L. Schoen y S. T. Yau, establece que, bajo las hipótesis adecuadas, la energía total de un sistema gravitatorio es positiva y sólo puede ser cero en un espacio plano. En 1981 Witten dio una prueba mucho más simple fundada en ideas primitivas de supergravedad.

La física matemática le debe también la creación de la teoría topológica cuántica de campos (topológica en el sentido de dinámica, o de hamiltoniano cero) en dimensiones 3, 4 y 5. Se proponía con ella desentrañar los invariantes de Donaldson para variedades de dimensión 4. En 1994 probó que dichos invariantes eran un caso particular de los que había postulado con D. Sieberg (invariantes Sieberg-Witten). El trabajo revolucionó la topología de dimensión cuatro.

Su interpretación de los invariantes de Jones (en honor de V. Jones, que asoció ciertos polinomios a nudos) como integrales de Feynman de una teoría gauge tridimensional nos lleva a la teoría de nudos. (En un marco técnico, Witten extendía la teoría de Jones de nudos en la esfera tridimensional a nudos en variedades arbitrarias de dimensión tres.)

Todos tenemos una idea intuitiva de los objetos geométricos llamados formalmente nudos y trenzas. Basta tomar una cuerda, anudarla y pegar después sus extremos para obtener así una figura topológicamente equivalente a una circunferencia; ahora bien, no puede transformarse en una circunferencia sin cortar la cuerda, desanudarla y volverla a pegar. Dos nudos que pueden transformarse uno en otro sin cortar la cuerda se llaman equivalentes. Por invariante se entiende la propiedad compartida por un nudo y sus equivalentes.

Otras nociones importa tener claras aquí. Denomínase coligación (*link*) a la colección de nudos entrelazados. Una trenza (*braid*) es una colección de cuerdas que unen puntos situados en planos paralelos y se han entrelazado entre sí sin anudar una cuerda con otra. Podemos formar dos trenzas del mismo número de cuerdas sin más que unir los extremos de una con los orígenes de la otra. Sabido esto, podemos dotar de una estructura algebraica de grupo al conjunto de clases de trenzas, de un número de cuerdas dado.

En 1923, Emil Artin dio una descripción de tales grupos en términos de generadores y relaciones. En efecto, una trenza genera una coligación si se pegan los extremos de las cuerdas que la forman. James Alexander, iniciador de la teoría de nudos, probó en 1928 que todas las coligaciones se podían obtener de esta forma.

En 1984, V. Jones descubrió una relación, sorprendente y de sumo interés en mecánica clásica y en mecánica cuántica, entre las álgebras de von Neumann (en honor de John von Neumann, son álgebras de operadores acotados en espacios de Hilbert) y los grupos de trenzas. Lo mismo en la mecánica clásica que en la cuántica, hay dos conceptos básicos: estados y observables. En mecánica clásica los estados son puntos de una variedad diferenciable; los observables son funciones sobre ella. En mecánica cuántica los puntos son subespacios unidimensionales de un espacio de Hilbert y los observables, operadores en el espacio.

El conjunto de observables tiene una estructura natural de álgebra, conmutativa en mecánica clásica y no conmutativa en cuántica. Resulta asombroso que los conjuntos de generadores y relaciones de las álgebras de von Neumann coincidan con los de los grupos de trenzas. Ello supone que los grupos de trenzas y las coligaciones tienen una vía natural de conexión con la mecánica cuántica.

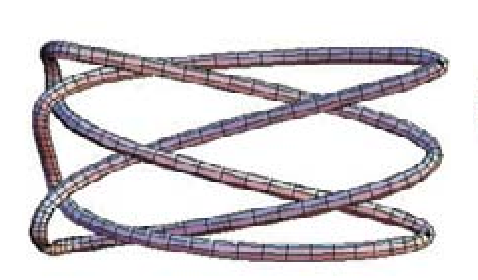
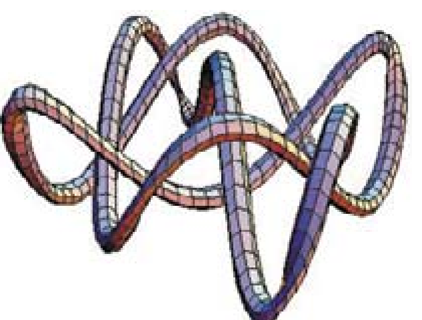
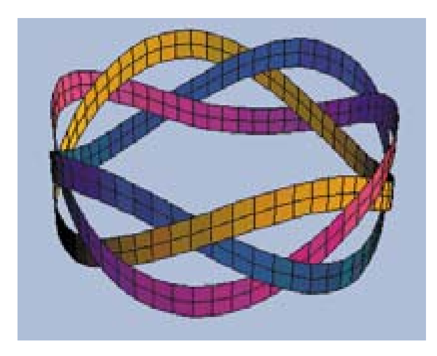
Podemos también abordar dichas álgebras mediante una construcción clásica de la geometría algebraica y de la teoría de Galois estudia los grupos de automorfismo de campos). En el caso clásico, con las álgebras conmutativas, un espacio está determinado esencialmente por su álgebra de funciones. Al extender esta idea al caso no conmutativo podemos dualizar las álgebras y asociarles los objetos conocidos por grupos cuánticos.

Las álgebras de Heinz Hopf y von Neumann habían sido estudiadas por algebristas puros. Drinfeld, primero, y Jones, después, les dieron un contenido físico interesante al aplicarlas al estudio de sistemas integrables cuánticos que posibilitó el descubrimiento de unos invariantes polinómicos de los nudos y coligaciones que revolucionaron la teoría de nudos, al establecer una fuerte relación de estos objetos, no sólo con el análisis funcional sino también con la representación de álgebras de Lie simples, la mecánica estadística y la teoría de grupos cuánticos.

Grupos simples finitos

En teoría de grupos, se han resuelto, en el arco de los últimos 25 años, el problema de la clasificación de grupos simples finitos y la conjetura sobre el orden de un grupo simple finito, avanzada por William Burnside (el problema de Burnside) en 1902. Un grupo es simple si no tiene subgrupos invariantes propios. En el Congreso Mundial Matemático celebrado en 1978 en Helsinki, Gorenstein afirmaba lo siguiente: “Mi objetivo es intentar convencerles de que la clasificación de los grupos simples finitos está casi terminada. Una afirmación presuntuosa, lo sé. No suele proclamarse que un teorema se halla a punto de demostrarse. Pero la clasificación de los grupos simples finitos es diferente de todos los teoremas que se han probado a lo largo de la historia; la demostración final ocupará unas 5000 páginas y, además, en este momento 4000 de ellas están en prensa o en galeradas.”

El propósito objetivo de Gorenstein encerraba extrema dificultad. Se conocían entonces familias clásicas de grupos simples y algunos grupos especiales llamados esporádicos, de los cuales hay 26. Desde

8. NUDOS Y COLIGACIONES. La idea de nudo es harto intuitiva. Basta tomar una cuerda, anudarla y pegar después sus extremos para obtener así una figura topológicamente equivalente a una circunferencia; ahora bien, no puede transformarse en una circunferencia sin cortar la cuerda, desanudarla y volverla a pegar. Dos nudos que pueden transformarse uno en otro sin cortar la cuerda se llaman equivalentes. Denomínase coligación a la colección de nudos entrelazados. Una trenza es una colección de cuerdas que unen puntos situados en planos paralelos y se han entrelazado entre sí sin anudar una cuerda con otra.

hacía más de 100 años se manejaban ya algunos. Pero la existencia de otros era una conjetura todavía en 1978; entre ellos, el "monstruo de Fischer-Griess", de unos 10^{53} elementos. Carecíamos también de una forma sistemática de describirlos todos. A esas dificultades se unía la de comprobar 5000 páginas de demostración para convencerse de que no había errores. Por fin, en 1981, la demostración estaba cerrada y fue aceptada por la generalidad de los especialistas.

En 1989 S. Borcherds (medalla Fields de 1998) probó la "conjetura del brillo lunar", establecida en 1970 por J. H. Conway y K. Norton, que relaciona el "monstruo de Fischer-Griess" con las curvas elípticas. Borcherds utiliza en su prueba ideas y técnicas provenientes de la física, en particular, de la teoría de supercuerdas.

En los años noventa, S. S. Abhyankar completó un programa de descripción de los grupos simples finitos como grupos fundamentales de curvas en característica positiva. Se desconocen todavía las propiedades específicas de las curvas de Abhyankar; si tales propiedades se encuentran, tendremos una demostración accesible del teorema de clasificación.

De planteamiento muy simple, el problema de Burnside expone que, si G es un grupo cuya operación designamos multiplicativamente, llamaremos orden de un elemento g al mínimo natural n tal que $g^n = 1$; al mínimo común múltiplo de los órdenes de los elementos de G lo denominaremos exponente del grupo. Un grupo se dice finitamente generado si existe en él una familia finita de elementos tales que todo elemento del grupo es producto de elementos de la familia. Es evidente que un grupo finito está finitamente generado y tiene también exponente finito. Pero el problema de Burnside es el recíproco: "¿Es cierto que todo grupo finitamente generado de exponente finito es finito?"

A una versión más débil del problema, propuesta como escalón previo en los años cincuenta, se la conoce por problema restringido de Burnside. En rigor técnico se expresa así: "¿Existe una función $b(d,m)$ tal que todo grupo finito de exponente d con m generadores tenga menos de $b(d,m)$ elementos?" En 1968 Sergei Novikov (medalla Fields de 1970) y S. I. Adian probaron que el problema de Burnside tenía respuesta negativa para exponente impar y mayor que 4381. Al mismo tiempo, M. Hall y G. Higman probaron que, para dar una respuesta positiva al problema restringido, era suficiente, supuesto que el número de grupos simples finitos de exponente n es finito, resolverlo para exponentes potencia de un número primo.

La terminación de la clasificación de los grupos simples finitos y la prueba por E. I. Zelmanov (medalla Fields de 1994) del problema restringido para exponente potencia de primo dieron, por fin, la respuesta general afirmativa al problema restringido.

Hemos dejado fuera de este panorama algunas ramas de la matemática más directamente ligadas a la computación o la física. En cálculo numérico ha habido interesantes avances, en los que ha participado el matemático español J. Sanz Serna. En conexión con el cálculo simbólico se han desarrollado nuevas ramas de la matemática, como el álgebra o la geometría computacionales. Y, en la frontera entre matemáticas e informática, ha surgido la informática teórica, área extraordinariamente activa.

En física la teoría de supercuerdas o la simetría especular son campos de confluencia de las técnicas más refinadas de geometría algebraica global y aritmética con la parte más abstracta de la mecánica. Con toda razón se ha dicho que las matemáticas se han convertido en la parte más barata de la física.

Bibliografía complementaria

MATHEMATICS FRONTIERS AN PERSPECTIVES. V. Arnold, M. Atiyah, P. Lax y B. Mazur (Ed.). A.M.S. Providence R.I.; 1999.

MATHEMATICS UNLIMITED 2001 AND BEYOND. B. Engquist y W. Schmid (Ed.). Springer Verlag. Berlín-Heidelberg-Nueva York; 2000.

Al-Biruni, el sabio que Occidente ignoró

Durante el florecimiento de la ciencia en el Oriente medieval, al-Biruni alcanzó unos conocimientos que precedieron en siglos a los desarrollados en Occidente

Gotthard Strohmaier

Si hace mil años hubiera existido un premio Nobel se habría otorgado, sin la menor duda, a toda una constelación de científicos musulmanes. Durante esa época Europa vivía aún bajo la influencia de la herencia cultural de Roma, y no eran precisamente las exigencias científicas las que correspondían a sus intereses. Muy al contrario, en el Oriente islámico se había formado un clima intelectual que no sólo permitía el estudio de los fenómenos naturales, de las matemáticas y de la medicina, sino que incluso lo promovía.

La zona de influencia de la religión fundada por Mahoma se extendía en el siglo X desde la península Ibérica hasta la frontera India, pasando por el norte de Africa y Asia occidental. Eruditos musulmanes recogían de buen grado el saber de los nuevos espacios culturales. El legado grecolatino era recibido del mismo modo que la ciencia hindú y los conocimientos de los persas de la época preislámica. Con la victoria sobre los chinos en la batalla de Samarcanda, en el año 751, los árabes adquirieron, a través de los prisioneros de guerra, el



1. AL-BIRUNI (a la izquierda con la inscripción árabe de su nombre) fue el sabio más importante de Oriente.

conocimiento de la fabricación del papel, y este material barato, junto con la elegancia de su caligrafía, que permitía una velocidad de escritura mayor que la latina, se convirtió en un factor de cultura decisivo.

En numerosos lugares de la zona árabe-islámica se desarrollaron centros intelectuales. En Bagdad, por ejemplo, se tradujo en los siglos IX y X prácticamente todo el material científico que al final de la Edad Antigua griega seguía vigente. Dentro de éste se incluía el "Corpus" de los escritos aristotélicos, la voluminosa obra de Galeno de Pérgamo (129-216) y el "Almagesto", el manual de astronomía de Ptolomeo (100-160 aproximadamente).

La ciencia árabe-islámica no se agotó en la transmisión del saber ya existente, sino que cohesionó los materiales de construcción disponibles y los desarrolló en gran medida mediante trabajos propios. De ese modo, los países de dominio musulmán aportaron gran cantidad de sabios que contribuyeron de una forma determinante al progreso científico.

Uno de los merecedores del "premio" hubiese sido Abu Ali al-Hasan ibn al-Haitham (965-1039 aproximadamente). Conocido en Occidente como Alhazen, este sabio egipcio e investigador de las ciencias naturales describió el efecto de las lentes ópticas y desarrolló espejos huecos. Debido a sus experimentos ópticos —600 años antes que Galileo y Kepler— merece ser considerado el primer físico experimental genuino de la historia. Otro de los candidatos sería el persa Abu Ali al-Husain ibn Abdallah ibn al-Hasan ibn Ali ibn Sina (980-1037 aprox.), autor de unos compendios de filosofía aristotélica y de medicina galénica utilizados como libros de texto durante siglos. Bajo su nombre latinizado de "Avicena" influyó con estas obras en la historia del pensamiento y de la medicina occidentales como ningún sabio no cristiano había hecho.

El historiador de la ciencia George Sarton otorgó, con todo, el primer puesto a otro coetáneo de Alhazen y de Avicena: Abu r-Raihan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni (973-1048). A diferencia de los dos anteriores, al-Biruni permaneció totalmente desconocido en Occidente. Sólo el orientalista francés Joseph Reinayd y el naturalista alemán Alexander von Humboldt divulgaron, a mediados del siglo XIX, su figura en Europa. No existe todavía ninguna edición completa alemana, inglesa o española de su obra. Se dispone sólo de una traducción rusa de los manuscritos árabes, que fue editada en Tashkent, en 1957, patria del sabio en el Asia Central.

Al-Biruni nació en Kath en septiembre del 973, capital del entonces reino de Joresm, situada a orillas del Amudaria, al sur del mar de Aral. Hoy pertenece esta región al Uzbekistán. Su destino lo llevó —unas veces de buen grado y otras, contra su voluntad— a diversos lugares de Asia central. A pesar de todas las circunstancias adversas al-Biruni se convirtió en el sabio más significativo del Medioevo islámico. Llevó a cabo contribuciones esenciales en matemática, astronomía, geodesia, mineralogía y farmacia. Sus escritos están impregnados de un vigor teórico y de una concepción humanística tales, que sólo un gran espíritu investigador puede lograr. La tarea polifacética realizada a lo largo de su vida no tiene parangón.



2. LAS CONSTELACIONES ESTELARES de la Antigüedad fueron representadas por los astrónomos árabes sobre globos celestes siguiendo el modelo helenístico. Este ejemplar data del año 1279.

Al-Biruni procedía de extracción humilde. Por motivos que ignoramos creció con los príncipes de la dinastía iraquí entonces reinante en Joresm. Abu Nasr Mansur ibn Ali ibn Iraq, miembro de la realeza, lo tomó bajo su protección. Fue una verdadera suerte para el joven al-Biruni, pues sólo en las proximidades de una corte de príncipes, que por otra parte, debido a la disgregación del Califato, habían proliferado abundantemente, podían desarrollarse las facultades creativas, gracias al ocio y a la seguridad material que ofrecían. El propio Abu Mansur fue un ilustrado; reelaboró "La Esférica" del matemático helenístico Menelao de Alejandría, la única forma en que nos ha llegado.

Ya a la edad de 17 años al-Biruni determinó, por sí mismo, la latitud de su ciudad natal. El hecho de que la Tierra fuera una esfera resultaba autoevidente para él. Medio milenio antes que Martin Behaim, que en 1492 construiría en Nürnberg su "manzana terrestre", creó al-Biruni un globo terráqueo. Con cinco metros de diámetro era diez veces mayor que el globo del alemán, aunque abarcaba solamente el hemisferio norte, pues se trataba en realidad de una semiesfera. Esto obedecía a motivos técnicos, ya que no se conocía apenas nada de los países más allá del ecua-

El autor

GOTTHARD STROHMAIER, colaborador del Corpus Medicorum Graecorum de la Academia de Ciencias de Berlín-Brandemburgo, enseña en el Seminario de Semíticas y Arabismo de la Universidad Libre de Berlín.

dor. Sobre la superficie esférica al-Biruni anotó las posiciones de ciudades, determinadas astronómicamente unas veces y otras, mediante referencias de su distancia tomadas de relatos de viajeros.

Pionero de la medición de la Tierra

Para determinar la posición, al-Biruni tenía que enfrentarse a los mismos problemas con que unos siglos más tarde aún lo hacían los navegantes europeos: mientras que la latitud geográfica de un lugar es fácil de obtener mediante la altura del Sol, para saber la longitud geográfica, es decir, la distancia angular a un meridiano cero establecido arbitrariamente, se necesita tener un signo temporal que se propague por el espacio. Los griegos sabían que para ello era suficiente un eclipse de Luna que fuera visto simultáneamente desde todos los lugares en los que este astro estuviera sobre el horizonte. La correcta medición exigía, sin embargo, una planificación previa que abarcara un espacio amplio. Para ello al-Biruni mantuvo correspondencia con Abu l-Wafa al-Buzdjani, astrónomo que vivía en Bagdad, y concluyó con él la medición común del correspondiente tiempo local en que ocurriría el eclipse del 24 de mayo del 997. Ambos investigadores establecieron la diferencia de tiempos locales de Kath y de Bagdad de una hora justa —sólo cinco minutos menos que el valor correcto— y con ello la veinticuatroava parte del círculo completo, o sea, 15 grados.

Otro problema científico afectaba al tamaño auténtico de la Tierra. Sobre su forma esférica, no había discusión para los familiarizados con Aristóteles y Ptolomeo. Al-Biruni cuenta divertido una disputa que tuvo lugar al comienzo del siglo X entre un filósofo cristiano y un teólogo musulmán. El último había arrancado, airado, unas páginas de una traducción de Aristóteles donde se decía que el agua del océano rodea a la Tierra, más pesada, y al punto medio del mundo, en forma de pelota. El teólogo insistía en que el agua líquida sólo podía tomar la forma de un cuerpo firme que la rodeara y, por consiguiente, debería desprenderse, en gotas, de la Tierra en el caso que ésta fuera esférica. Al-Biruni comenta al respecto: “Si yo hubiese estado en el lugar [del filósofo] le hubiera gritado al oído y le hubiera mordido en los dedos, esperando con este ataque devolverlo a la razón. Pero el diálogo con ellos resulta inútil y una auténtica pérdida de tiempo”.

Cien años antes de tal disputa, al-Ma’mun (786-833), hijo y sucesor del legendario jalifa Harun ar-Rashid, hizo medir la distancia que abarcaba un grado de latitud en la planicie desértica vecina a Mosul. Para ello utilizó un método descrito por Eratóstenes (276-196 a.C.). El resultado, de 113 km, era sorprendente, por lo exacto: sólo un 1,5 % mayor que el valor moderno. Al-Biruni describió el costoso procedimiento, pero se le denegó una repetición de la medición, pues hubiera necesitado para ello muchos colaboradores y, en los tiempos inseguros que corrían, también una cobertura militar. Optó por otro procedimiento que ya había probado al-Ma’mun y para el cual no existía precedente griego.

El jalifa había ordenado medir, durante una incursión militar a la costa de Asia menor, la altura de una montaña, y a continuación colocar en su cima un bastón de referencia, dirigido, en el momento de la puesta del Sol, hacia el horizonte marino. A par-



En la batalla de Tours y de Poitiers Carlos Martel defiende a Francia contra los invasores árabes

Los árabes invaden España

Batalla junto a Samarcanda; los árabes vencen a los chinos y aprenden la técnica de la fabricación del papel



Los normandos atacan el monasterio inglés de Lindisfarme. Se inicia la era vikinga

Traducción árabe del Almagesto de Ptolomeo; medición árabe del grado en Mesopotamia

Números indios
Números arábigos

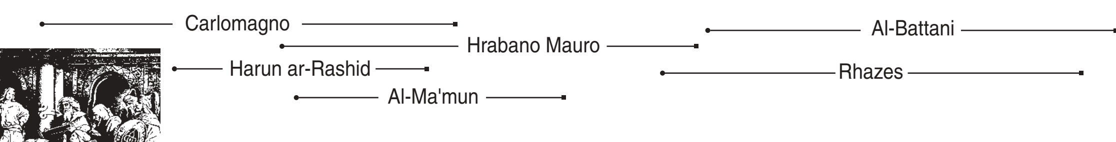
Los buyíes, shiítas persas, se apoderan de Bagdad; los jalifas caen en una situación de irrelevancia política

Comienza el florecimiento de la ciencia y del arte en el Islam

Los árabes adoptan los números indios, incluyendo el cero

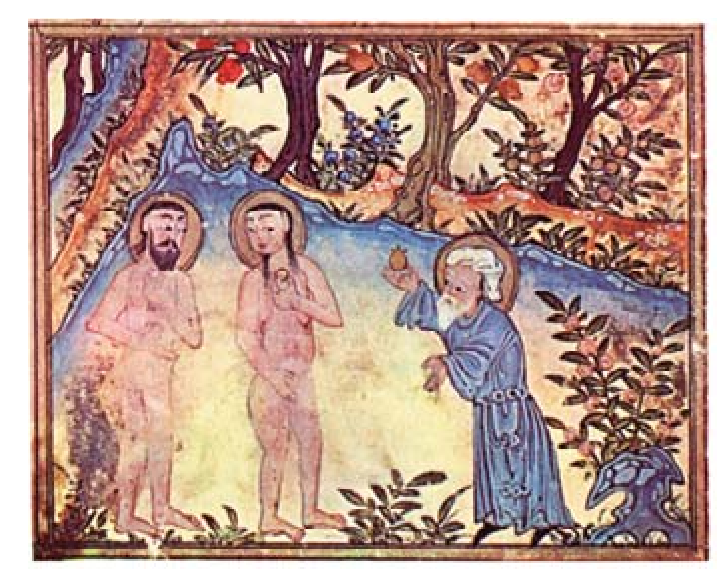
Córdoba dispone de una biblioteca con 400.000 volúmenes

700 — 800 — 900



Carlomagno — Hrabano Mauro — Harun ar-Rashid — Al-Ma'mun — Al-Battani — Rhazes

3. EN LA “CRONOLOGIA DE LOS PUEBLOS ANTIGUOS” al-Biruni menciona la historia bíblica. Esta ilustración de un escrito del año 1307 muestra a Adán y Eva con el diablo, que el Corán no representa en figura de serpiente, sino de hombre.



tir de la diferencia de ángulo medido entre la horizontal y la altitud conocida de la montaña pudo calcularse la magnitud de la esfera terrestre. Al-Biruni no dispuso en realidad de una costa marítima, pero en sus últimos años de vida pudo utilizar como substitutivo la extensa llanura del Indo. Hacia el año 1023 se encontraba en la fortificación de Nandana, que dominaba la planicie del Pandjab desde el borde de la cordillera afgana. Desde una montaña vecina distinguía bien la línea del horizonte de la llanura lisa frente al azul del cielo. De este modo dio un valor 110.275 metros a la 360ava parte del perímetro terrestre.

Que al-Biruni se ocupara tempranamente de geodesia y de trigonometría esférica hay que atribuirlo a su maestro Abu Nasr Mansur. Estas disciplinas gozaban en los territorios islámicos de especial predilección, pues en la segunda Azora del Corán se ordena a los creyentes una determinada postura en el momento de rezar: “Adondequiera que salgas, dirige tu rostro en dirección a la mezquita sagrada, y dondequiera que estéis, dirigid vuestro rostro hacia ese lugar”. Al-Biruni se sonreía ante los ingenuos que sabían bien dónde se hallaba la Kaaba… a condición de estar situados en las inmediaciones de La Meca. A mayores distancias se orientaban por la dirección del viento o por la posición del Sol a mediodía, ya que éste se encontraba en La Meca y en verano en su zenit, y creían que en toda la Tierra era mediodía al mismo tiempo.

Al-Biruni experimentó, repetidas veces, a lo largo de su vida hasta qué punto un investigador dependía de la protección de un soberano. Cuando en el año 995 fue derrocada la dinastía de los iraquíes en Joresm, perdió su privilegiado estatuto y hubo de abandonar su patria. Halló refugio en la ciudad persa de Rayy, cerca de la actual Teherán. Allí entabló conocimiento con el astrónomo al-Judjandi; éste, bien relacionado con su príncipe, pudo construir un sextante gigantesco de veinte metros de diámetro. Con semejante aparato de medición, dispuesto a lo largo de la línea del meridiano y medio soterrado, estableció la oblicuidad de la eclíptica en 23 grados 32 minutos y 19 segundos, valor más cercano al vigente hoy en día, de 23 grados y 27 minutos, que el propuesto por Ptolomeo, de 23 grados 52 minutos. Gracias a la mayor dimensión de los instrumentos, la precisión de las mediciones obtenida era mayor. Este principio fue llevado a su perfección 400 años más tarde por el soberano e investigador Ulug Beg: el tamaño del sextante gigante que construyó en su observatorio, junto a Samarcanda, doblaba las dimensiones del dispositivo realizado por al-Judjandi.

La disputa con Avicena

Pero al-Biruni no consiguió un puesto en la corte de Rayy. Por ello decidió pronto regresar a Kath, su ciudad de origen. Es posible que en esa decisión





Alfonso VI de Castilla reconquista Toledo a los árabes

1ª Cruzada

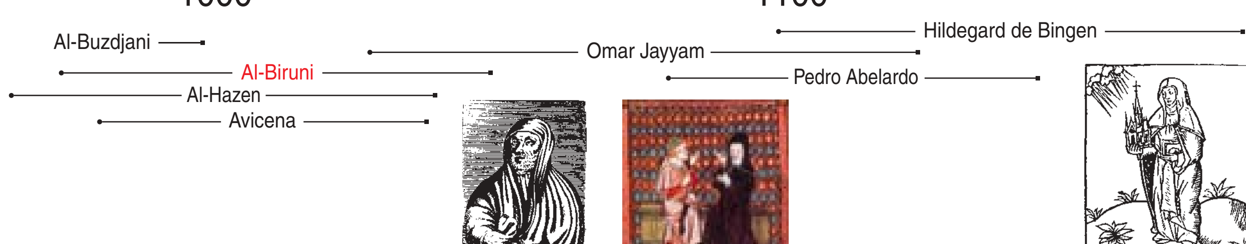


2ª Cruzada

En Salerno la medicina toma un gran impulso gracias al contacto con los árabes de la cercana Sicilia

Se traducen al latín los manuscritos árabes; se fundan escuelas de medicina en Montpellier, Bolonia, Padua y París

1000 — 1100 — 1200





4. LAS RUINAS DEL SEXTANTE del observatorio de Ulug Beg en Samarcanda, del año 1428. Se trata de una versión ampliada de un instrumento que, más de 400 años antes, había construido el astrónomo al-Judjandi cerca de la ciudad persa de Rayy.

contara también el propósito de utilizar el eclipse de Luna de mayo del 997 para determinar la longitud. Además, desde Kath disponía de una línea de base mucho más larga hasta al-Buzdjani, su colega de Bagdad, que desde Rayy.

De nuevo al-Biruni abandonó su patria en el 998. Se trasladó a Gurgan, en la costa sudeste del mar Caspio, donde fue recibido generosamente en la corte del soberano Qabus. Allí compuso algunas obras astronómicas; entre ellas, un tratado para la construcción del astrolabio. Permitía ese instrumento fijar la posición de las estrellas, determinar la hora e incluso acometer mediciones geodésicas y cálculos trigonométricos.

Al-Biruni pasó unos cinco años en Gurgan. Luego se trasladó a Gurguench, la nueva capital del reino de Joresm. Allí se habían reunido varios sabios en una especie de academia, incluido su maestro Abu Nasr Mansur. Más tarde se agregó Avicena, quien, por mor de sus relaciones cambiantes con el poder, había huido de Bujara, su patria chica.

En su nueva residencia, al-Biruni se dedicó con ahínco a problemas de física. Para medir la densidad de metales y piedras preciosas construyó un recipiente con un rebosadero del cual un cuerpo, con un determinado peso, desalojaba cierta cantidad de agua; cuerpos de igual peso, pero con una menor o mayor densidad, desalojaban, en correspondencia, más o menos agua. Con este procedimiento, los alquimistas, que también infestaban el mundo islámico, hubieran podido comprobar el oro falso de sus laboratorios, cosa que nunca hicieron. Al-Biruni guardó para sí un sano escepticismo; así juzgó en cierta ocasión, de pasada, a sus contemporáneos: "Muchos entendidos han perdido la cabeza en la Alquimia, mientras que gran cantidad de estúpidos se burlan de ellos y de sus adeptos". En realidad su actividad era mucho más racional que la de los magos, ya que no necesitaban sus conjuros. Entre los alquimistas se notaba ya una voluntad "faustiana" de cambiar el mundo, de la que carecía aún la antigua filosofía natural de corte netamente especulativo.

El más selecto representante de ésta fue Aristóteles, aunque al-Biruni no estaba de acuerdo con todas las ideas y explicaciones del pensador griego. Por ello, en la época de la segunda estancia en su ciudad natal de Kath, acudió con algunas preguntas a Avicena, que vivía por entonces en Bujara y que a pesar de su juventud era tenido por un experto en filosofía aristotélica.

El intercambio epistolar entre al-Biruni y Avicena abarcó una amplia diversidad de fenómenos naturales. Aristóteles admitía cuatro elementos terrestres esenciales: tierra, agua, aire y fuego. De su unión resultaban los distintos cuerpos. Igualmente suponía que éstos, bajo determinadas circunstancias, se transformaban unos en otros, de manera parecida a los distintos estados de agregación. Al-Biruni preguntó a Avicena si el agua, al evaporarse, sólo se dispersaba en el aire haciéndose invisible o bien se convertía ella misma en aire. El interrogado consideró correcto únicamente lo último y puso como prueba algunos de sus propios experimentos. Para ello colocó unas botellas llenas de agua en un horno que, con el calor, estallaron. Según la interpretación de Avicena, el agua había tomado en el calor la nueva forma de aire que necesitaba más espacio. Una dispersión de las partículas de agua no hubiera podido desarrollar tal fuerza explosiva. Sólo más tarde al-Biruni observó con sus propios ojos que el vapor de mercurio se transformaba, al enfriarlo de nuevo, en auténtico mercurio, y por consiguiente no había perdido nunca su forma.

Al-Biruni preguntó también por qué unas botellas llenas de agua explotaban al congelarse, si todos los cuerpos encogían al enfriarse. Avicena le enseñó que el agua se encogía efectivamente, pero, como según Aristóteles no existe el vacío, se producía entonces una presión en el recipiente que hacía romper sus paredes. Pero al-Biruni prestó mayor atención y advirtió que el recubrimiento no se deformaba por la presión hacia adentro sino hacia fuera.

Precursores de la idea de una nueva imagen del mundo

En estos ejemplos se pone de manifiesto una diferencia fundamental entre los dos sabios islámicos: para Avicena, que se apoyaba firmemente en la forma de pensar de los antiguos, el experimento ocasional servía para demostrar una teoría propuesta de antemano. Al-Biruni, por el contrario, esbozó los primeros enunciados que permitían rom-

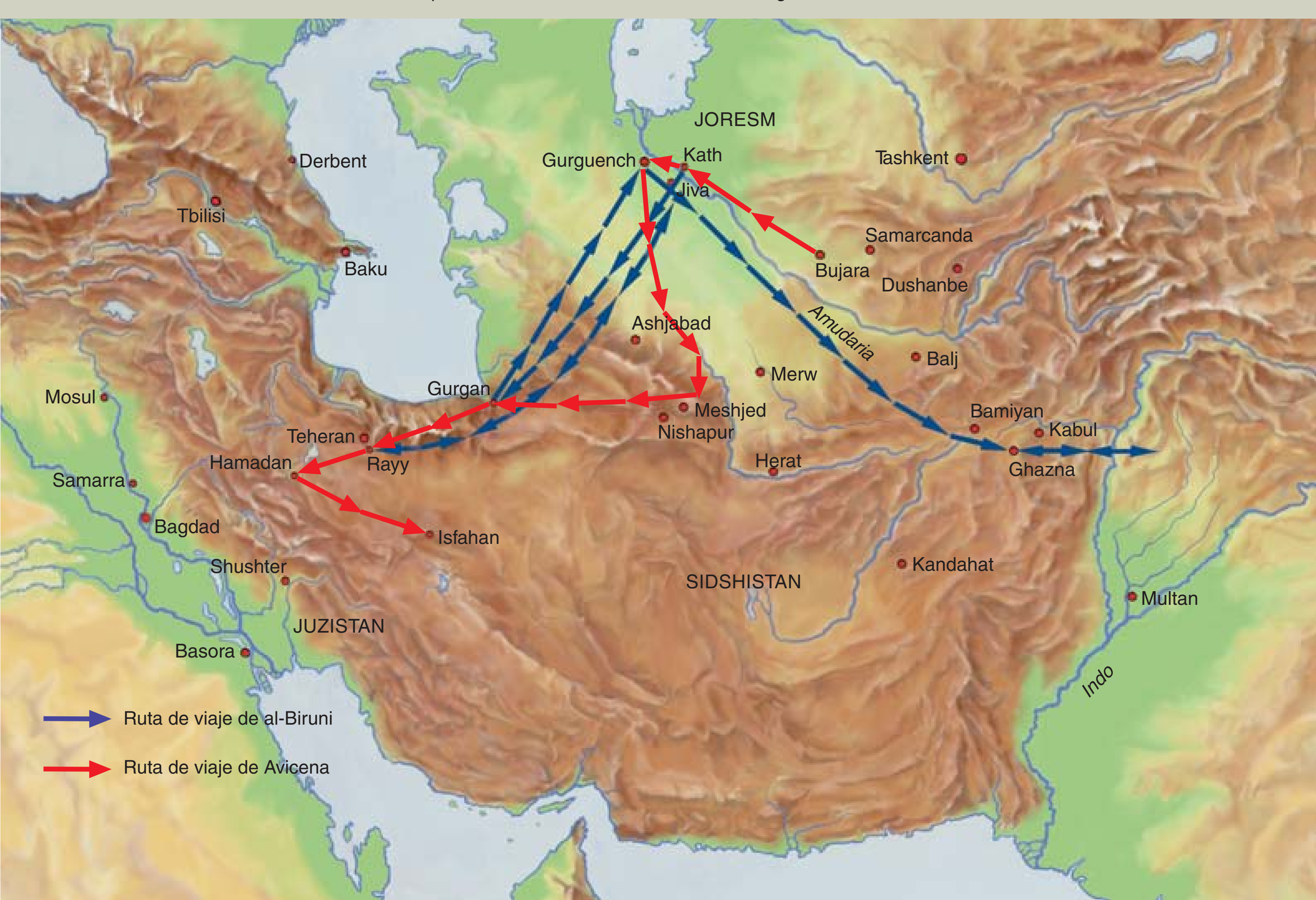
per el cerco envolvente de la concepción aristotélico-ptolemaica del mundo. Sus experimentos iban ya en la dirección con que hoy en día se designa a las falsaciones. Mientras que Avicena intentó más tarde apuntalar teóricamente en su "Canon de la Medicina" la idea comúnmente aceptada sobre el carácter venenoso de los diamantes, al-Biruni relata en su "Mineralogía": "en cierta ocasión dieron en mi presencia diamantes a un perro, pero no se produjo ninguna reacción, ni inmediata ni al cabo de un tiempo".

En el año 1013/1014 comenzaron en Joresm una serie de disturbios políticos que no sólo tuvieron una importancia decisiva en las sucesivas circunstancias vitales de al-Biruni y de Avicena, sino que influyeron también en gran medida en el curso de la historia de la ciencia y la cultura. Desde Ghazna, su ciudad de residencia, el sultán Mahmud llevó a cabo una tenaz política de conquistas. Su zona de dominio se extendía desde Georgia en el oeste hasta el valle del Indo en el este. A continuación, en el norte, incorporó Joresm de manera pacífica a sus dominios, dando en matrimonio al shah de esta ciudad a su hermana. Cuando la nobleza de Joresm se levantó contra la arbitrariedad de Mahmud y mató al shah, Mahmud halló el momento para invadir con su ejército el pequeño estado y vengar a su cuñado. Al-Biruni, que gozaba de la confianza del shah, se libró de la muerte, pero fue deportado junto con innumerables cautivos a Ghazna. Avicena había huido, por las mismas fechas, a Gurguench; tras muchas aventuras llegó a Isfahan, después de pasar por Gurgan y por Rayy.

Al-Biruni se acomodó a su nuevo destino. Pese a no ser el poderoso Mahmud un promotor de la cultura, la presencia de un sabio en la corte no resul-

Etapas de la vida de al-Biruni y de Avicena

Al-Biruni tuvo que abandonar su ciudad natal, Kath, en el año 995, cuando el emir de Gurguench (la actual Kunya Urguench en Turkmenistán) asaltó la ciudad e hizo ejecutar a su soberano. Al-Biruni huyó a la ciudad persa de Rayy, cerca de Teherán, pero regresó dos años más tarde a su ciudad natal para determinar la distancia entre Kath y Bagdad sirviéndose de un eclipse de Luna. Tras buscar a un mecenas, encontró finalmente el apoyo de un príncipe en Gurgan, en la costa meridional del mar Caspio. En el año 1004 se trasladó a Gurguench, donde varios sabios, entre los que se contaba Avicena, oriundo de Bujara, se agruparon en una pequeña academia. Después de unos desórdenes políticos, el déspota Mahmud, que reinaba desde Ghazna sobre amplios territorios de Asia occidental, atacó en el año 1017 con un ejército la ciudad de Joresm, llevándose numerosos cautivos —entre ellos, al-Biruni— a Afganistán. Avicena mientras tanto había conseguido escaparse y, tras muchas aventuras, se refugió en Isfahan.



taba del todo inútil. En cierta ocasión apareció en Ghazna un enviado de los búlgaros de la zona del Volga pidiendo audiencia. Durante la entrevista contó que en el extremo norte había zonas donde en verano nunca se ponía el sol. Mahmud se irritó y lo acusó de herejía, dado que la obligatoriedad de la oración cotidiana cinco veces y el ayuno del Ramadan se basaban en la salida y la puesta del sol. Al-Biruni mostró su disconformidad y pudo demostrar que el fenómeno descrito tenía su explicación. En su "Geodesia" expone que los habitantes de las riberas del Báltico se hacen a la mar y "viajan siguiendo la dirección del polo norte celeste hasta llegar a un lugar donde el sol, en su estación estival, gira sobre el horizonte. Ellos observan eso y se pavonean entre sus gentes por haber alcanzado el lugar en el que no existe la noche".

Mahmud emprendió reiteradas expediciones militares a la India noroccidental. Como defensor de la fe musulmana saqueó sus templos y se llevó riquezas, elefantes y esclavos a Ghazna. Al-Biruni pudo —o debió— acompañarlo, aprovechando la circunstancia para acometer varios estudios, aprendizaje del sánscrito incluido. Fruto de estos viajes fue la redacción de una monografía exhaustiva sobre la India, en la que analizaba todo cuanto le llamaba la atención de aquel mundo ajeno: el sistema de castas, el politeísmo, la transmigración de las almas, los extraños conceptos de pureza ritual y las vacas sagradas.

Al principio al-Biruni esperaba que, a través del contacto con los astrónomos indios, aprendiera algo nuevo. Se llevó, sin embargo, una decepción. Ciertas cosas se correspondían con asuntos que los griegos habían ya elaborado e incluso mejorado. A eso se añadían concesiones a la religión popular, como las cuestiones de los eclipses de Luna y de Sol, que incluso hoy en día tienen un papel importante, y que se atribuían a un demonio invisible del cielo. Descubrió que el origen de esta falsa creencia residía en la concepción hindú del universo, que situaba la Luna por encima del Sol y, por tanto, "necesitaban algo que concerniera a ambos astros, como un pan redondo a un pescado". En conjunto, pudo comparar la ciencia india "al nácar mezclado con trozos de barro, o a perlas rodeadas de estiércol, o incluso a cristal de roca tallado bajo un montón de guijarros". Echaba en falta el amor incondicional a la verdad que otrora distinguiera a una persona como Sócrates. Para instruir a sus colegas indios, les tradujo el tratado matemático de Euclides, el manual de astronomía de Ptolomeo y algunas cuestiones sobre la construcción del astrolabio.

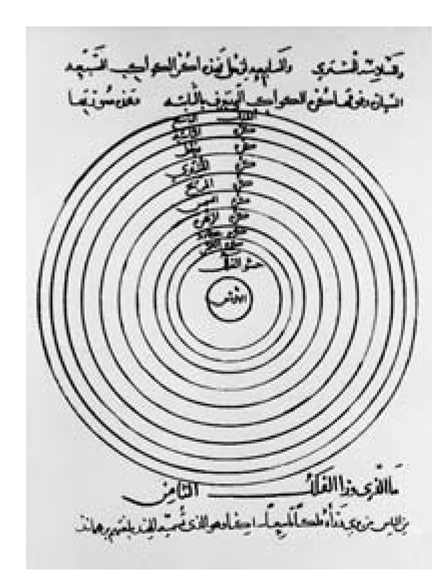
5. LOS ASTROLABIOS servían en la Edad Media como instrumentos de medir universales. Estos predecesores de las cartas estelares giratorias y del sextante fueron inventados en la antigua Grecia, desarrollados por los científicos musulmanes y empleados durante siglos por astrónomos y marinos.

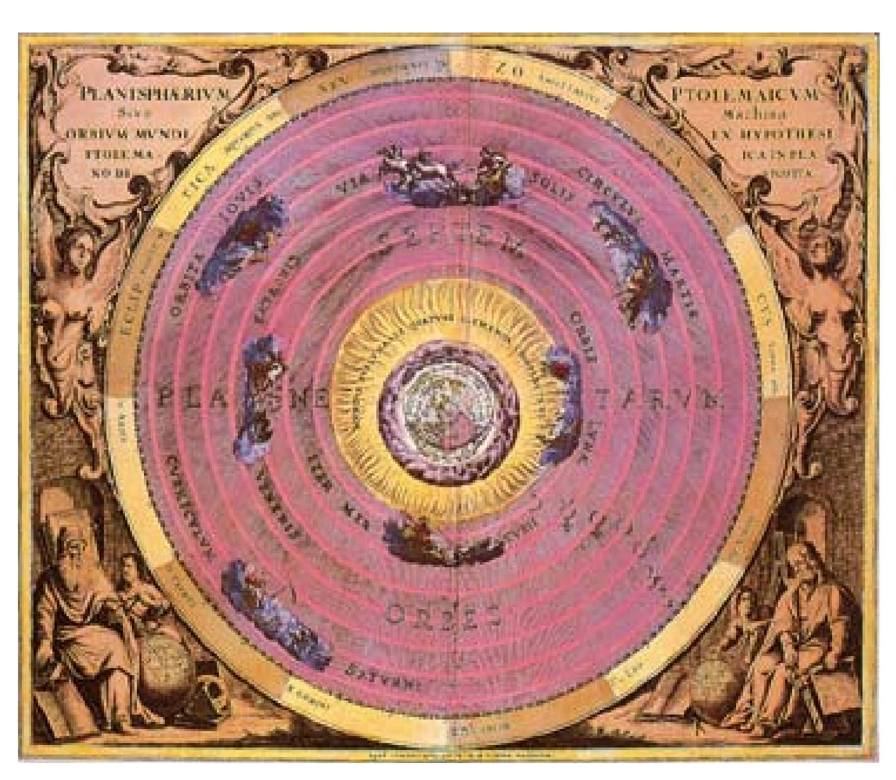
Europa dejó perder una oportunidad

Al leer el libro sobre "la India" recibe uno a veces la impresión de que se halla ante un arrogante funcionario británico colonial, instruido, pero con una simpatía limitada por la cultura del país. La verdad es que al-Biruni quería dar a entender que todos los errores de la civilización india podían corregirse con la adopción del Islam, religión que ya había hecho de los antiguos árabes seres civilizados. De este modo, al-Biruni, con su incursión en esa cultura ajena, proporcionó una gran ayuda a las expediciones de pillaje y de conquista de un personaje como Mahmud o de sus sucesores que impregnaron de otra identidad una parte del subcontinente.

Los europeos podríamos estar contentos si en nuestro continente hubiésemos tenido, al comienzo del primer milenio, una figura como al-Biruni, que hubiera aprendido latín y, con la mirada perspicaz del que observa desde fuera, hubiera adoptado la historia y la discreta cultura de nuestros antepasados de Europa occidental.

Los romanos de la antigüedad, a pesar de la solidez de su administración, de su jurisprudencia y de su arquitectura, transmitieron sólo magros retazos del saber antiguo a los monjes y estudiosos ansiosos de conocimiento del Medioevo latino. La abadesa Hildegard de Bingen (1098-1179), pretendidamente dotada de poderes proféticos, impresiona al lector ac-





6. EN SU “INTRODUCCION A LOS ELEMENTOS DE LA ASTROLOGIA” **al-Biruni diseñó el modelo del mundo ptolemaico con la Tierra en el centro y las esferas de los astros que la circundaban (*arriba, izquierda*); a la derecha, el mismo modelo sobre una placa de cobre de Andreas Cellarius del año 1708.**

tual por su fresca mirada al hombre y a su entorno natural. Pero lo que ella explicó en su “Causae et curae” sobre las fases de la Luna, que se enciende como un bastón de madera, o sobre sus eclipses, causados por una tormenta, está muy por debajo del nivel de la ciencia islámica coetánea.

Pero el importante desnivel intelectual entre Oriente y Occidente no podía permanecer largo tiempo sin compensarse. El proceso comenzó con lentitud a finales del siglo X en el norte de España, en la zona de contacto con la parte árabe de la Península, precisamente con la recepción del astrolabio ya mencionado y con la traducción de las instrucciones de uso que lo acompañaban. La admiración por ese logro de la técnica fue tal, que el filósofo Pedro Abelardo (1079-1142) puso el nombre de “Astrolabio” a su hijo, que había traído al mundo con su esposa y alumna Eloísa. El instrumento, del que se hicieron numerosas reproducciones, era sólo la llamada variante planisférica que los griegos ya habían desarrollado; además existían muchas otras que al-Biruni había mostrado en uno de sus escritos.

Un tipo de astrolabio, llamado “navicular” por su forma de barca, atrajo un interés especial: estaba concebido de modo que la Tierra giraba en medio del cosmos y la superficie más externa de la esfera, en la que se representaban las estrellas fijas, permanecía inmóvil. Eso no constituía aún la revolución heliocéntrica de Copérnico, pero supuso la mitad del camino recorrido. Al-Biruni señaló que, desde un punto de vista puramente matemático, no había ninguna objeción que hacer a ese tipo de concepción; con todo, existían motivos físicos en contra, ya que los hombres tendrían que notar algo del rapidísimo movimiento de la superficie terrestre. El péndulo de Foucault, por desgracia, no se había inventado todavía.

A mediados del siglo XII se inició en España una dilatada actividad traductora. En Toledo, Gerardo de Cremona tradujo, entre otros muchos trabajos árabes, el “Canon de la Medicina” de Avicena, así como el “Almagesto” de Ptolomeo. El “Qanun Mas’udi” de al-Biruni, que representaba una concepción mejor y más moderna de la astronomía, no se hallaba entonces al alcance de los traductores. Por ello los científicos musulmanes aparecieron a las generaciones posteriores como simples transmisores de la ciencia griega. Hubo que esperar a la arabística moderna para que se descubriera la figura de al-Biruni. Cuando un público más amplio pudo fijarse en él, la ciencia europea lo había ya sobrepasado en todos los conceptos.

Bibliografía complementaria

AL-BIRUNI. De E. S. Kennedy en *Dictionary of Scientific Biography*, ed. Ch. C. Gillispie, vol. 2, pág. 147; Nueva York 1970.

AL-BIRUNI. IN DEN GÄRTEN DER WISSENSCHAFT. Textos escogidos de las obras del científico musulmán universal, traducidos y comentados por G. Strohmaier, edición corregida, Leipzig 1991.

AVICENNA. G. Strohmaier, Munich 1999.

Juan M. R. Parrondo

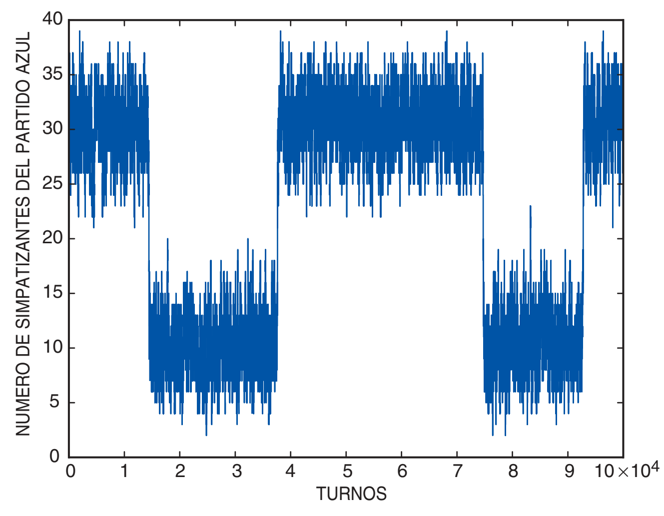
Las matemáticas de la opinión pública

¿Pueden tener algo que ver la opinión pública, los imanes y el origen de las fuerzas fundamentales de la naturaleza? Aunque se trate de asuntos tan dispares, los modelos matemáticos que los describen comparten una propiedad que ha sido fundamental en la física moderna: la *ruptura de simetría*. Afortunadamente, para ilustrar de modo básico esta propiedad no hace falta ser un experto en magnetismo o en teorías de unificación de campos de fuerza, sino que basta explorar un juego matemático que emula de modo extremadamente simplificado una lucha política completamente desprovista de ideología.

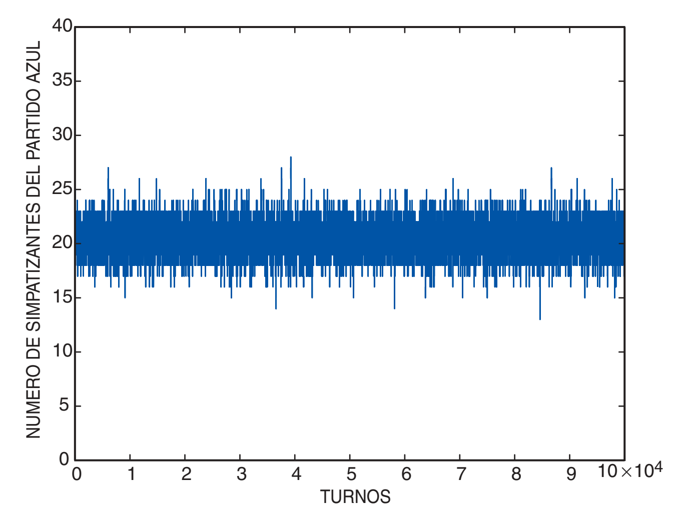
Dos grupos políticos, el Azul y el Blanco, se disputan el ayuntamiento de un pequeño pueblo de 41 habitantes. Cada uno de los habitantes se alinea con uno de los dos partidos, pero de vez en cuando puede cambiar de opinión. Podemos representar el "estado de opinión" de nuestro pueblo mediante un tablero con dos grandes casillas, una blanca y otra azul, en las que se encuentran 41 fichas. En cada turno se elige al azar una de las 41 fichas y se mueve de acuerdo con ciertas reglas. Imaginemos primero que a los habitantes de nuestro pueblo no les gusta demasiado discrepar, es decir, tienen una cierta tendencia a seguir los dictados de la mayoría. Esta tendencia queda reflejada en las siguientes reglas para el movimiento de la ficha elegida al azar: se coloca en la casilla en donde hay más fichas (o casilla mayoritaria) con una probabilidad 0,75 y se coloca en la casilla minoritaria con una probabilidad del 0,25 (como el número total de fichas es 41, es decir, impar, siempre habrá una casilla mayoritaria y otra minoritaria).

Con estas sencillas reglas de juego, el comportamiento de la opinión pública del pueblo es ya bastante interesante. Supongamos que durante un gran número de turnos el partido Azul es el mayoritario. En toda esta fase del juego, el 75 % de las fichas movidas irá a parar a las filas azules y el 25 % a las blancas. Si la fase ha durado mucho más de 41 turnos, entonces el 75 % de la población, unas 30 personas, estará, en media, en el partido Azul y el 25 % restante en el Blanco. Sin embargo, esta distribución de la población sólo es cierta en media, ya que el comportamiento de cada individuo está sujeto al azar y habrá por ello fluctuaciones en torno a la distribución media. De hecho, las fluctuaciones pueden ser tan grandes como para inclinar la balanza hacia el partido contrincante.

En la gráfica de la figura 1 podemos ver cómo se comporta el número de simpatizantes del partido Azul. La he realizado simulando el juego en el ordenador durante 100.000 turnos. En los primeros momentos del juego, el partido Azul es mayoritario y el número de simpatizantes fluctúa en torno a 30. Hay fluctuaciones que hacen que el número se acerque a 20 y peligre la mayoría, pero logra recuperarla en varias ocasiones, hasta que, en un turno cercano al 15.000, el partido Blanco le arrebata la mayoría y la mantiene durante otros 23.000 tur-



1. Número de simpatizantes del partido Azul en función del número de turnos jugados, cuando los habitantes del pueblo tienen una probabilidad 0,75 de alinearse con el partido mayoritario

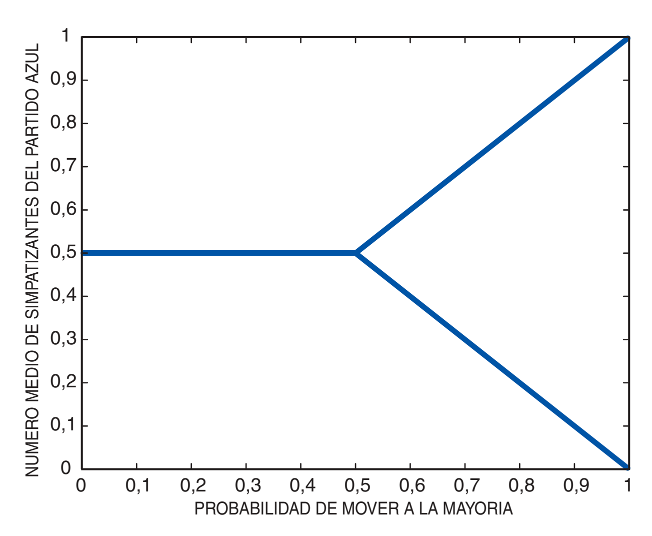


2. Número de simpatizantes del partido Azul en función del número de turnos jugados, cuando los habitantes del pueblo tienen una probabilidad 0,25 de alinearse con el partido mayoritario

nos, aproximadamente. En ese período el número de simpatizantes del partido Azul fluctúa en torno a 10 y el número de simpatizantes del Blanco fluctúa en torno a 30. Vemos que los cambios de mayoría se producen al azar, tras intervalos que son del orden de 20.000 turnos.

¿Qué ocurre si cambiamos la probabilidad de mover a la casilla mayoritaria? Siguiendo nuestro anterior razonamiento, se podría pensar que la fracción de habitantes del pueblo que simpatizan con el partido mayoritario es siempre igual a la probabilidad de mover a la casilla mayoritaria. Sin embargo, esto sólo es cierto si dicha probabilidad es mayor que 0,5. En el caso contrario nos encontramos ante individuos que prefieren alinearse con la opción minoritaria. Lo que ocurre entonces es que la proporción de simpatizantes de cada partido fluctúa en torno al 50 %. En efecto, en cuanto uno de los partidos comienza, por fluctuaciones, a tener más simpatizantes que el otro, los habitantes de nuestro pueblo, ahora amantes de las minorías, comenzarán a apoyar al partido minoritario. Es decir, ante cualquier desviación del reparto 50-50 entre los dos partidos, aparecerá una tendencia que tratará de restituir la situación de igualdad. Podemos verlo en la gráfica de la figura 2, en donde la probabilidad de que una ficha se mueva a la casilla mayoritaria es 0,25. Comprobamos también que las fluctuaciones ahora son bastante menos intensas que en el caso en que los habitantes preferían alinearse con el partido mayoritario (¿puede el lector averiguar por qué?).

Reuniendo todo lo que hemos deducido acerca del comportamiento de los habitantes de nuestro pueblo, podemos representar en una tercera gráfica el número medio de simpatizantes del partido Azul en función de la probabilidad de que una ficha se mueva a la casilla mayoritaria. El resultado se muestra en la figura 3. La línea que indica el número medio de simpatizantes se bifurca en dos cuando la probabilidad es 0,5; eso significa que, por encima de esa probabilidad, el número medio puede tomar dos valores posibles. El valor que de hecho toma depende del número inicial de simpatizantes de cada partido o, si éstos son cercanos al 50 % de la población total, dependerá de las fluctuaciones iniciales.



3. Número medio de simpatizantes del partido Azul en función de la probabilidad de alinearse con el partido mayoritario

Observe el lector que las reglas del juego no favorecen a ninguno de los dos partidos, pero estas mismas reglas, o más concretamente, el hecho de que dependan del comportamiento del resto de la población, hacen que uno de los partidos se convierta en mayoritario. En otras palabras, las reglas son simétricas ante el intercambio de partidos. Sin embargo, durante lapsos de tiempo bastante grandes (que aumentan considerablemente si se toma un pueblo con más habitantes), el "estado de opinión" no tiene esa simetría, sino que uno de los partidos vence a su oponente. Aunque ahora parezca simple, para la física fue una auténtica revolución percatarse de que el estado de un sistema puede no tener las simetrías que tienen las reglas que determinan el comportamiento de dicho sistema. Este es el fenómeno denominado *ruptura espontánea de simetría*. El adjetivo espontáneo es muy apropiado, ya que indica que la ruptura de la simetría se produce espontáneamente, debida a fluctuaciones, sin que haya nada en las reglas de evolución que indique hacia dónde se realizará dicha ruptura.

En física, estas rupturas de simetría se comenzaron a estudiar en materiales magnéticos, es decir, en imanes. Un imán puede considerarse como un conjunto de pequeñas brújulas que tienden a orientarse en la dirección de un campo magnético y que, a su vez, crean campos magnéticos. De modo que cada brújula tiende a orientarse en la misma dirección que sus vecinas, igual que los habitantes de nuestro pueblo: en el caso en el que la probabilidad de adherirse a la mayoría sea mayor que 0,5, tienden a adoptar la opinión de la mayoría. En ausencia de campo magnético externo, las reglas que determinan la evolución de las pequeñas brújulas son perfectamente simétricas, ya que no favorecen ninguna dirección en especial. A pesar de ello, la tendencia de las brújulas a apuntar en la misma dirección que sus vecinas es capaz de romper esta simetría, siempre que la temperatura del imán sea suficientemente baja. Si la temperatura es alta, el comportamiento de las brújulas está sujeto a fuertes fluctuaciones, que son mayores que la propia tendencia a ordenar las orientaciones de las brújulas. Para temperaturas bajas, sin embargo, estamos ante una ruptura espontánea de simetría, que es la que hace posible que existan imanes permanentes como los que colocamos en la puerta de nuestro frigorífico. Una cuestión importante es que el estado macroscópico del imán, es decir, la orientación final de las brújulas, se determina a través de fluctuaciones que afectan a unas pocas brújulas, es decir, a fluctuaciones microscópicas. La ruptura de simetría puede considerarse como una amplificación de fluctuaciones microscópicas, como un mecanismo por el cual el azar microscópico invade el mundo macroscópico.

El concepto de ruptura de simetría ha sido utilizado también

en la teoría cuántica de campos, es decir, en el conjunto de teorías que tratan de explicar el origen de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. En este caso, la simetría que se rompe es bastante complicada y se refiere a que las reglas de evolución de los campos de fuerza y de las partículas elementales no favorecen ninguna combinación de ciertas propiedades internas de las partículas y los campos, como la carga. La incorporación de la idea de ruptura espontánea de simetría, junto con algunos otros hallazgos, fue capaz de sacar a la teoría cuántica de campos de lo que muchos denominan la "era oscura" por la que atravesó en los años sesenta del siglo XX, y permitió establecer una teoría unificada de la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil.

Volviendo a los modelos de comportamiento de la opinión pública, dejaré a los lectores la solución de un modelo un poco más complicado y que ya no tiene una relación estrecha con la ruptura de simetría. Este nuevo juego es una variación de un ejemplo creado por el matemático Ehud Kail, experto en teoría de juegos. En este caso la decisión que tienen que tomar los individuos de nuestro problema es si van o no a un cierto bar de moda en la ciudad. Otra novedad es que la población se divide ahora en tres grupos: los *conservadores*, los *poetas* y los *snobs*. Los conservadores tienden a tomar la decisión adoptada por la mayoría, mientras que los poetas quieren ser siempre singulares y prefieren alinearse con la minoría. Por último, los snobs quieren hacer lo que hacen los poetas, sin preocuparles si se trata de una decisión mayoritaria o minoritaria. El problema puede de nuevo interpretarse con un juego con dos casillas "ir al bar" y "quedarse en casa" y tres tipos de fichas. Las reglas podrían ser las siguientes: se elige una ficha al azar, si es conservador irá con una probabilidad 0,95 a la casilla mayoritaria; si es poeta, con una probabilidad del 0,05; si es *snob*, irá con una probabilidad del 0,95 a la casilla en donde haya mayoría de poetas. Se puede empezar escogiendo una población de 11 poetas, 31 *snobs* y 43 conservadores, pero invito a los lectores a explorar otras combinaciones, así como otras probabilidades de movimiento. ¿Cuál es, en media, la proporción de individuos en la casilla mayoritaria? ¿Cómo son las fluctuaciones en este juego? Lo discutiremos los próximos meses.

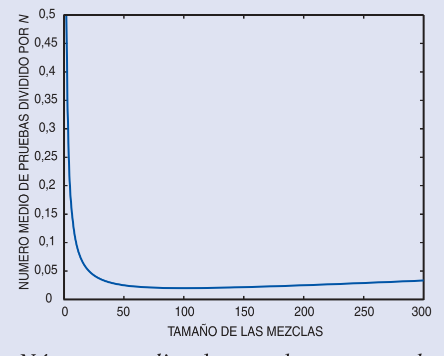
Solución del problema del banco de sangre

Jacobo Sánchez, estudiante de física de la Universidad de Valencia, me ha enviado una solución impecable del problema de las mezclas de sangre (*Investigación y Ciencia* del mes de agosto) para las pruebas del virus letal. Recordemos que se trataba de averiguar cuántas muestras de sangre se debían mezclar para que el número de pruebas a realizar fuera el mínimo. Expondré aquí una versión simplificada de la solución de Jacobo. El virus ataca a un 0,01 % de la población. Si se mezclan n muestras de sangre, la probabilidad de que la mezcla esté infectada es aproximadamente igual a 0,0001 por n. En este caso hay que realizar n pruebas para detectar cuáles de los integrantes de la muestra están infectados. Por otro lado, si la mezcla no está infectada, no hace falta hacer ninguna prueba adicional. Para cada mezcla, el número medio de pruebas a realizar por cada grupo mezclado (contando la que se realiza a la mezcla) es entonces $1 + 0{,}0001 \times n \times n = 1 + 0{,}0001 \times n^2$. Si tenemos un total de N muestras, al mezclarlas en grupos de n muestras, tendremos N/n grupos. Por tanto, el número total de pruebas, en media, es:

$$N/n\,(1 + 0{,}0001 \times n^2) = N\,(1/n + 0{,}0001 \times n)$$

Observen que esta fórmula tiene dos sumandos: el primero se hace más pequeño cuanto mayor es n, mientras que el segundo crece con n. Si se repasa el argumento que hemos utilizado, es fácil ver que el primer sumando proviene de la prueba que se hace a la mezcla, mientras que el segundo proviene de las pruebas que hay que hacer a las muestras individuales si el resultado de la prueba de la mezcla es positivo. Esta es la esencia del problema: cuantas más sangres se mezclan, menos grupos tenemos, pero por otro lado es más probable que la prueba de la mezcla sea positiva, en cuyo caso tenemos que realizar las pruebas a todas y cada una de las sangres que componen la muestra. El tamaño óptimo de la mezcla es aquel que logra un compromiso entre los dos sumandos de la fórmula.

La mejor forma de averiguar este tamaño óptimo es representar la cantidad $1/n + 0{,}0001 \times n$ en función del tamaño n de la mezcla. En la figura pueden ver la gráfica que se obtiene y comprobar que el mínimo se alcanza para $n = 100$. Por lo tanto, el banco de sangre debería mezclar 100 muestras de sangre. Con esta estrategia, un 1 % de las mezclas daría pruebas positivas y, por cada 100 muestras de sangre, habría que hacer, en media, sólo 2 pruebas, lo cual supone un ahorro considerable para el banco de sangre.



Número medio de pruebas por cada N muestras, en función del tamaño de las mezclas

Observemos también que la respuesta no coincide con la que da la teoría de la información, tal y como apuntábamos en el número de agosto. Con dicha estrategia la probabilidad de que la mezcla fuera positiva era 0,5, mientras que, con la calculada en los párrafos anteriores, es 0,01. Pero recordemos que aquella estrategia era óptima sólo si, en el caso de que la prueba de la mezcla fuera positiva, continuábamos el proceso realizando submezclas con las sangres sospechosas.

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

La moneda délfica

La exacta predicción del futuro es de la máxima utilidad en los juegos de apuestas... y se nos viene a la mente la bolsa de valores. Desafortunadamente, resulta difícil dar con oráculos perfectos (y de nuevo se nos ocurre la bolsa de valores). ¿Cómo sacar provecho de los falaces oráculos que es probable que encontremos?

Tenemos, para empezar, 100 euros, y hemos de hacer 10 apuestas. Cada una quedará decidida mediante el lanzamiento de una moneda. El oráculo nos predirá de qué lado va a caer, pero es posible que mienta (aunque no más de una vez) y puede que lo haga después de saber cuánto hemos apostado en ese envite. Tenemos un contrincante dispuesto a pagar uno contra uno en cualquiera de nuestras apuestas, por lo que si arriesgamos x euros, nos devolverá $2x$ euros si el oráculo dijo la verdad en esa ocasión, mientras que si el oráculo miente, se embolsará nuestra apuesta. ¿Cómo terminar con el máximo importe final posible, con independencia del momento en que el oráculo decida mentir?

He aquí un segundo problema: supongamos necesario decidir por anticipado el importe de todas las apuestas, sin saber, claro está, cuándo va a mentir el oráculo. ¿Cuáles deberían ser nuestras apuestas en tal caso, y cuál sería el importe final que podríamos asegurarnos, con independencia del momento en que el oráculo opte por mentir (si es que lo hace)? Una cosa más: perderemos todo si proyectamos apostar en un determinado momento, pero resulta que nos falta dinero en ese instante.

Como ejercicio preliminar para el primer problema: supongamos que sean tres los lanzamientos y las mentiras, una a lo sumo. Tenemos 100 euros. ¿Cuánto deberemos apostar la primera vez? Dado el resultado, ¿cuánto, la segunda y la tercera vez? Podemos ver en la figura algunas posibles variantes.

EJERCICIO PRELIMINAR: ¿Cuánto conviene apostar?

TENEMOS 100 €
APOSTAMOS 50 €
ORACULO
VERDAD
MENTIRA
TENEMOS 150 €
APOSTAMOS 50 €
TENEMOS 50 €
APOSTAMOS 50 €
TENEMOS 200 €
NO APOSTAMOS NADA
TENEMOS 100 €
APOSTAMOS 100 €
TENEMOS 100 €
APOSTAMOS 100 €
RESULTADO NETO:
HEMOS DUPLICADO NUESTRO DINERO

Solución del problema del mes pasado:

En un círculo de 10 cm o más de radio, cualquier configuración de rojo y azul ha de satisfacer la condición bicolor para 10 cm.

He aquí la demostración: tómense dos puntos del círculo —el R, que es rojo, y el B, azul— que se encuentren separados entre 10 y 20 cm. Trácense sendas circunferencias de 10 cm de radio con centro en estos puntos. Habrán de cortarse en uno o en dos puntos, y al menos uno de ellos se hallará dentro del círculo original. Sea Q tal punto.

Si Q es rojo, el segmento B-Q mide 10 cm y tiene dos colores.

Si Q es azul, el segmento R-Q mide 10 cm y tiene dos colores. En cualquier caso, la configuración cumple la condición estipulada.

IDEAS APLICADAS

Mark Fischetti

Electrónica de carga muscular

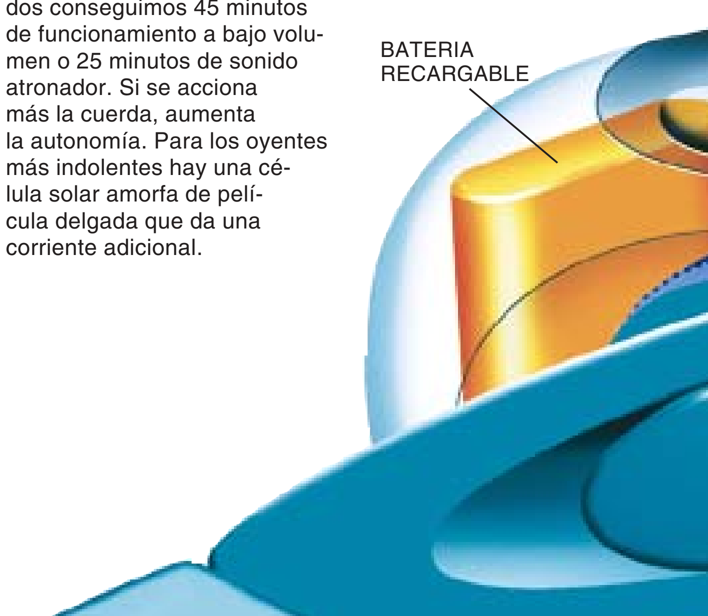
Agítese la linterna y ésta dará luz. Hágase rotar la manivela de la radio y disfrute de la música. A diferencia de generaciones precedentes de aparatos electrónicos de carga cinética, de autonomía muy limitada, los nuevos modelos almacenan la energía muscular en resortes, baterías y condensadores que la restituyen demorada en el tiempo.

Desde 1995, Freeplay Energy, de Londres, ha vendido más de 2,5 millones de radios y linternas de este tipo. En sus productos originales, al accionar una llave se arrollaba una tira de acero tensa de diez metros de largo que luego se desenrollaba lentamente. En su nueva línea de productos, la llave rota una transmisión miniatura que acciona un alternador que carga las baterías del sistema. Treinta segundos de esfuerzo muscular suponen 40 minutos de sonido u ocho minutos de luz. Los modelos serán de dimensiones y peso reducidos, contra la tendencia habitual de los aparatos electrónicos.

La gente compra este tipo de aparatos, de precios normalmente comprendidos entre 50 y 80 dólares, porque está cansada de gastar dinero en pilas. Pero según Vaughan Wiles, director comercial de Freeplay, el mercado no será masivo hasta que los precios "caigan en la zona de los 29 dólares". Podrían estar a la vista más negocios. Este otoño, Coleman, gigante de los equipos para intemperie, pone a la venta una linterna Freeplay bajo su propia marca, así como la radio. Además Freeplay tiene planes para un generador de accionamiento manual equipado con una electrónica capaz de recargar teléfonos celulares. AladdinPower, de Tampa, comercializa un cargador de pedal que funciona como una bomba de pedal y recarga las baterías de teléfonos celulares, ordenadores portátiles y videocámaras.

El diseño de unos aparatos que resulten prácticos requiere "unos componentes muy pequeños, muy robustos y muy eficientes, capaces de generar energía cuando la cuerda la accione una anciana y, pese a ello, actuar correctamente cuando la llave la maneje un tipo poco delicado que la trate brutalmente", afirma John Hutchinson, director técnico de Freeplay. No menos importante es minimizar el desgaste mecánico. Al carro se han subido varias compañías de nueva creación, pero hay productos que simplemente no funcionan bien.

1. CUANDO GIRAMOS LA MANIVELA de una radio AM/FM Bravo de Freeplay rotan los engranajes de una diminuta transmisión que acciona un alternador. Este envía corriente a una batería recargable de hidruro de níquel de 3,6 volt. Si damos cuerda durante 30 segundos conseguimos 45 minutos de funcionamiento a bajo volumen o 25 minutos de sonido atronador. Si se acciona más la cuerda, aumenta la autonomía. Para los oyentes más indolentes hay una célula solar amorfa de película delgada que da una corriente adicional.



2. CUANDO LLEVAMOS un reloj cinético Seiko durante nuestra actividad cotidiana generamos un movimiento que basta para accionar su mecanismo. Cuando el reloj está inmóvil, unas células de memoria pueden guardar la hora durante cuatro años.

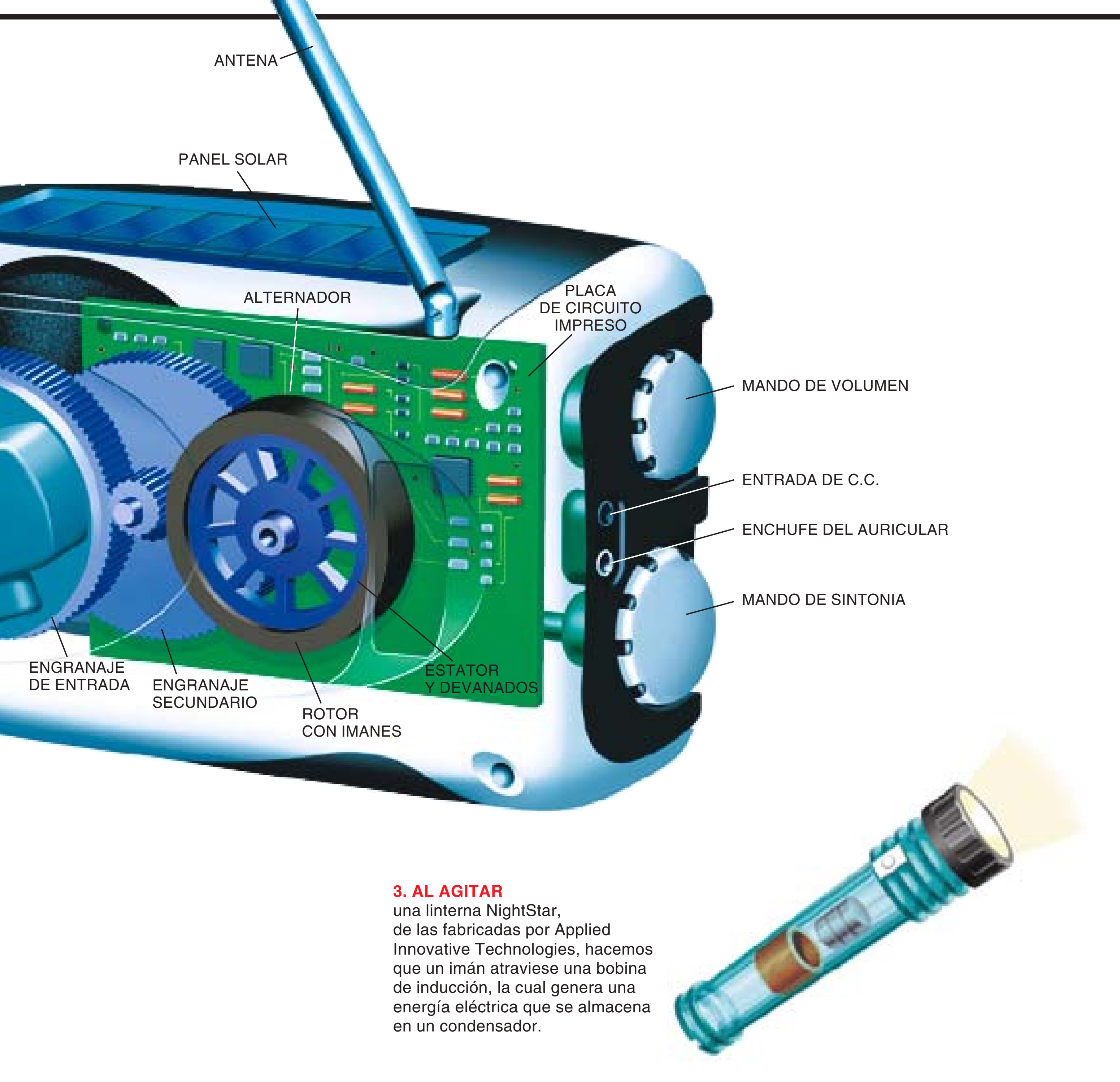


¿SABIA USTED QUE...?

➤ **EMPEZANDO A PIE** La Compañía de Calzado Eléctrico, de Leicester (Inglaterra), está estudiando la manera de cargar baterías aprovechando el andar humano. Uno de los zapatos en desarrollo tiene material piezoeléctrico en la suela, con lo que genera una tensión eléctrica cada vez que se comprime. Otro zapato lleva una dinamo en el tacón que genera una corriente eléctrica a cada pisada.

➤ **UN RELOJ CALIDO** El reloj Thermic de Seiko se alimenta con el calor del cuerpo. El brazo calienta el reverso de la caja de acero inoxidable, mientras que la cara de acero superior adquiere la temperatura del aire ambiente. Una sección intermedia de poliarilato aísla las capas y, para accionar el reloj, capta minúsculas porciones de energía de la diferencia termométrica.

➤ **ALIVIO** La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa está estudiando numerosos planes para convertir gradientes mecánicos, térmicos y químicos en energía eléctrica que pueda aligerar el peso de las baterías que lleve un soldado o alimentar vehículos robóticos y sensores de poner-y-dejar. Está tentando en cosas que van desde la pisada de una bota a las diferencias en la química de los sedimentos oceánicos. Tenemos también la célula energética alimentada por orina: la urea se hidrolizaría en dióxido de carbono y amoniaco y éste se oxidaría dando nitrógeno y agua, sustancias necesarias para conseguir corriente.



3. AL AGITAR una linterna NightStar, de las fabricadas por Applied Innovative Technologies, hacemos que un imán atraviese una bobina de inducción, la cual genera una energía eléctrica que se almacena en un condensador.

NEXOS

James Burke

Cavilaciones matinales

Estaba yo lavando el otro día las tazas del desayuno y pensando sobre lo que escribiría aquí este mes cuando se me ocurrió la idea de que lo que estaba haciendo era un ejemplo perfecto de las extrañas conexiones que hay entre nuestro mundo cotidiano y los sucesos del remoto pasado. Como sucede con cualquier otra cosa, si uno se fija lo suficiente. Un ejemplo pudiera constituirlo algo tan poco llamativo como el chorro de agua que salía a presión del grifo y con el que yo intentaba borrar las huellas de mi desayuno.

En las afueras de París se construyó, tiempo ha, un sistema primitivo de canalización de agua a presión. Era en el siglo XVII. Extraía agua del Sena y la impulsaba gracias a una bomba de proporciones tales que el pueblo en que se encontraba trocó su nombre original de Marly por el de Marly-la-Machine. La máquina en cuestión era una serie de bombas alimentadas por molinos de agua y estaba destinada al abastecimiento de las fontanas ornamentales del palacio de Versalles, distante escasos kilómetros. El coste que suponía propulsar el agua a una altura considerable quedaba compensado con el regocijo que proporcionaba al rey y a sus diversas amantes. Fuentes y amigas son extravagancias muy convenientes si la cartera rebosa. Cuando llegaron los finales del siglo XVIII la economía francesa no atravesaba ya su mejor momento. Y ahora que caigo, tampoco el rey.

Las cosas cambiaron en 1797 cuando Joseph Montgolfier, tripulante de globos y papelero (así de curiosas eran las ocupaciones por entonces), mostró al nuevo gobierno republicano un invento que podía garantizar el suministro de agua a Versalles (y también a otros canales, redes de riego y conducciones urbanas democráticas) sin gastos ni mantenimiento reseñables, puesto que apenas tenía partes móviles.

La prensa hidráulica de Montgolfier, con sus válvulas de escape, aprovechaba la corriente del río para comprimir aire, lo que luego permitía arrojar chorros de agua hacia arriba, hacia abajo o hacia los lados hasta ciento veinte veces por minuto. Al morir Montgolfier funcionaban setecientas prensas de ésas por toda Europa. Ninguna llevaba el agua a Versalles. Acabada la monarquía, se acabaron las fuentes.

Las prensas podían levantar muchas cosas con tanta presión. El ingeniero inglés William Fairbairn usó una variante en 1850 para colocar en su sitio una serie de tubos macizos de hierro de sección rectangular y mil doscientas toneladas de peso, a una velocidad de seis centímetros por minuto, para un puente ferroviario de Menai Straits, Gales.

Fairbairn también contrató a un sujeto de nombre Richard Roberts, que había inventado una remachadora automática. La máquina utilizaba tarjetas perforadas, que Roberts había visto utilizar para el manejo de los telares de seda (de los que hemos tratado en otra ocasión y por motivo distinto). Las tarjetas se organizaban de tal manera que impidieran o permitieran el paso de unos garfios a resorte. Los ganchos que atravesaban la tarjeta recogían los hilos que el patrón determinaba, de suerte que la lanzadera pasara por debajo de los mismos. Roberts usaba sus tarjetas de una forma parecida para organizar el tamaño, el número y la posición de los remaches sobre la pieza trabajada.

Herman Hollerith retomó la misma idea de las tarjetas perforadas con muy distinto propósito, decenios más tarde y en los Estados Unidos. Hollerith compartiría el proyecto con otras personas que con el paso de los años cambiarían el nombre de la empresa por el de IBM.

La eficacia de la técnica de remachado de Roberts llamó también la atención de otro avispado ingeniero. Isambard Kingdom Brunel, que así se llamaba, había concebido un gigantesco barco de hierro, el *Great Eastern*, en cuya construcción pensaba utilizar las mismas estructuras metálicas que tan buen resultado habían dado en el puente de Menai. Los cálculos realizados predecían que se necesitarían tres millones de remaches sólo para el casco.

Como luego se demostraría, los remaches fueron lo único que funcionó bien de la nave. Los ingenieros iniciaron su construcción junto a los bancos del Támesis. Al final descubrirían que quedaba demasiado alejada del río para que su botadura fuese factible. Se necesitaron varios meses y varios millones de libras para moverla con ayuda de grúas, rampas deslizantes, poleas y demás artilugios. Aun así, sólo al sexto intento se hizo a la mar. Antes de su primera singladura, que fue hacia América, ya habían ocurrido tantos percances que no se ocuparon más que 38 de las 300 plazas de primera clase. Incluso hubo un retraso final de todo un día debido al estado de embriaguez de la marinería. Las cosas todavía podían empeorar y hacia 1865 al mayor barco del mundo no se le pudo dar mejor destino que tender el novísimo cable telegráfico transatlántico submarino. A nadie debe extrañar que se perdiera el cable al seccionarlo el ancla del barco, aunque se recuperara un año más tarde.

El cable aún estaba en buenas condiciones cuando los ingenieros empalmaron sus extremos, porque su recubrimiento se había hecho con gutapercha, una pasta prodigiosa que se obtenía del látex de plantas tropicales de Malasia. Pero el descubrimiento de la gutapercha dio pie a cosas más sorprendentes que el mensaje protocolario que el

nueva riqueza forjada, los mejores jugadores de golf del mundo.

Aparte de las minas de carbón escocesas, la técnica de Nielson también abrió posibilidades inesperadas para los empobrecidos propietarios de los yacimientos de antracita de Pennsylvania, sustancia no menos difícil de quemar y que de repente se volvió útil. En escaso tiempo Pittsburgh se convirtió en la ciudad de acero de los Estados Unidos. Se construyeron vías férreas para transportar mineral de hierro desde los Grandes Lagos y con ellas se desarrolló el mundo de los negocios, con su comparsa de contabilidades, salarios mensuales, organización por funciones y departamentos y demás trucos administrativos.

Esta gigantesca industria del hierro y el acero, alimentada con antracita, pronto llenó el paisaje de Pennsylvania de montañas de escoria. Dio la casualidad de que el gran químico inglés Joseph Priestley, simpatizante de la revolución americana, pasó allí sus años postreros de refugiado. Y fue él quien observó que el carbón de coque era un excelente conductor de la electricidad. Edward Acheson, de Pittsburgh, quiso sacar partido de estas observaciones y colocó carbón y arcilla en un horno eléctrico. Hacia 1885 ya había dado con el segundo material más duro del mundo: el carborundo.

No es de extrañar que Acheson se adentrara pronto en el negocio de la abrasión. Los fragmentos de carborundo que colocó en ruedas de pulir crearon sensación, lo que sin duda le fue de ayuda para obtener el contrato de las luces con que George Westinghouse iluminó en 1893 la Exposición Universal de Chicago. Y siguen utilizándose actualmente, aunque se utilicen adhesivos sintéticos y un disolvente llamado furfural.

El furfural se obtiene añadiendo ácido sulfúrico y agua a presión a una mezcla de residuos vegetales, como pudieran ser los salvados de cereales o los restos del desayuno que tan disciplinadamente limpiaba yo el otro día.

presidente norteamericano James Buchanan dirigió a la reina Victoria. Gracias a ella aparecieron las primeras instalaciones eléctricas en los hogares y también la goma de mascar, amén de revolucionar el golf.

Las pelotas de golf se habían fabricado hasta entonces con relleno de plumas. El problema era que la mayoría no resistía más allá de tres hoyos. En 1848 llegó la gutapercha y con ella una pelota de golf sólida, suficientemente esférica como para encaminarse hacia el agujero deseado y que podía emplearse en más de una competición. Las nuevas pelotas fueron aceptadas a regañadientes por los celosamente tradicionales propietarios de St. Andrews, conscientes de ser el más importante club de golf del mundo. Las minúsculas pelotas cambiaron la cara de los campos de golf en más de un sentido.

Hacia 1850 las bolas de golf resultaban tan baratas que el juego atraía a trenes enteros de trabajadores escoceses en vacaciones. Para dar cabida a tamaño aluvión, St. Andrews decidió dividir longitudinalmente las pistas, que eran muy anchas, de forma que la segunda mitad se jugara en sentido opuesto a la primera. Esta es la razón de por qué una competición de golf tenga dieciocho hoyos en vez de los nueve de los que originalmente se componía.

Es probable que el hacinamiento hiciera que se caldeara el ambiente en esos primeros juegos de golf de St. Andrews. Este aire caliente era a su vez la razón por la que había tantos trabajadores dispuestos a perfeccionar sus golpes. El río Clyde de Glasgow aspiraba a ser por aquel entonces la vía fluvial más transitada del mundo. No lo lograría, porque lo único imprescindible para cualquier región industrial con aspiraciones era el carbón. Las tierras bajas escocesas guardaban cientos de toneladas del mineral, pero de tan ínfima calidad que con dificultad podían hacer una tostada, no digamos ya fundir el hierro.

James B. Nielson, jefe de Glasgow Gasworks, inventó en 1827 unos altos hornos de gas a presión que conseguían temperaturas lo suficientemente altas como para quemar cualquier combustible. El proceso Nielson no sólo permitía fabricar hierro con el carbón de mala calidad, sino que incluso triplicaba el rendimiento que se hubiera conseguido utilizando carbón del bueno. En pocos años llegó la revolución industrial escocesa, los astilleros del Clyde y las ciudades más guarras del mundo. Y, con la

LIBROS

Matemática griega

De Tales a Ptolomeo

DICTIONNAIRE DES PHILOSOPHES ANTIQUES. III. D'ECCÉLOS À JUVÉNAL. Bajo la dirección de Richard Goulet. CNRS Editions; París, 2000. **ANCIENT AND MEDIEVAL TRADITIONS IN THE EXACT SCIENCES. ESSAYS IN MEMORY OF WILBUR KNORR.** Dirigido por Patrick Suppes, Julius M. Moravsick y Henry Mendell. CSLI Publications; Stanford, 2000.

MATHÉMATIQUES PYTHAGORICIENNES ET PLATONICIENNES, por Jules Vuillemin. Editions Albert Blanchard; París, 2001. **THE MATHEMATICS OF PLATO'S ACADEMY. A NEW RECONSTRUCTION,** por David Fowler. Oxford University Press; Oxford, 1999. **ARISTÓTELES: SOBRE LAS LÍNEAS INDIVISIBLES-MECÁNICA. EUCLIDES: OPTICA-CATÓPTRICA-FENÓMENOS.** Introducción, traducción y notas de Paloma Ortiz García. Gredos; Madrid, 2000.

AUTOUR DE *LA DIOPTRE* D'HÉRON D'ALEXANDRIE. Textos reunidos y preparados por Gilbert Argoud y Jean-Yves Guillaumin. Publications de l'Université de Saint-Etienne; Saint-Etienne, 2000. **TRIGONOMETRY,** por I. M. Gelfand y M. Saul. Birkhäuser; Basilea, 2001. **PTOLEMY'S GEOGRAPHY.** Traducción anotada e introducción de J. Lennart Berggren y Alexander Jones. Princeton University Press; Princeton, 2000.

PAPPUS OF ALEXANDRIA AND THE MATHEMATICS OF LATE ANTIQUITY, por S. Cuomo. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

La primera sorpresa que le aguarda a quien se aproxime a la matemática griega es que no sabrá por dónde empezar. Cierto es que existe una secuencia fiable de autores, con los que nos ha familiarizado la historia de la cultura en general y de la filosofía en particular. Pero no podemos decir lo mismo de las doctrinas y filiaciones matemáticas. La primera prueba explícita y directa de la matemática griega data probablemente del 385 a.C. y corresponde a un fragmento del *Menón* platónico.

Antes de que nos llegaran escritas en códices bizantinos, las obras matemáticas originales sufrieron a lo largo de los siglos un proceso incesante de reelaboración que torna imposible atribuir qué a quién. A imagen de su maestro Aristóteles, que trazó el curso de la filosofía precedente, Eudemo escribió una historia de la geometría, una historia de la aritmética y una historia de la astronomía, perdidas en su mayor parte. En los *Elementos* de Euclides, compuestos en torno al 300 a.C., se adivinan aspectos sustantivos de creaciones anteriores, si bien esa obra, capital con las *Secciones cónicas* de Apolonio, pasó por mil manos antes de cristalizar en el texto que conocemos. No podemos prestar mucho crédito a los escritos hagiográficos de Yámblico en el siglo III d.C. sobre los pitagóricos. Mayor fiabilidad merecen los testimonios de Pappus, de finales de esa misma centuria, y de Proclo, de la siguiente.

Con todas las reservas, pues, seguiremos el método cronológico, que permite asociar pensamiento filosófico y nociones matemáticas. Y así empezaremos por Tales de Mileto (*c*.640-*c*.556 a.C.), fundador de la escuela jónica, en la que brillaron, entre otros, Anaximandro, Anaxímenes y Anaxágoras. (Para conocer el estado de la cuestión de determinados autores nos ayudará el *Dictionnaire des Philosophes Antiques*.) Se considera a Tales puente con la matemática egipcia; de hecho se le atribuye el cálculo de la altura de las pirámides. Por semejanza de triángulos deducía la distancia de un barco en mar abierto a la orilla.

En esa misma escuela pudo haberse formado Pitágoras, quien creó su círculo en Crotona. Los pitagóricos, con Filolao y Arquitas de Tareno en la cúspide, pusieron los cimientos de la teoría de números. En los números veían los componentes geométricos últimos de los objetos materiales. De acuerdo con la forma geométrica creada con la organización de los puntos elementales, distinguían entre números triangulares (3 y 6, por ejemplo), cuadrados (4, 9, etc.) y poligonales (pentágono, hexágono y superiores).

Llamaron perfecto al número que equivale a la suma de sus divisores, salvo el propio número (por ejemplo, 6, 28 y 496); excesivo, al que superaba dicha suma y, defectivo, al que era inferior. Descubrieron una regla para hallar tripletas de enteros. Y estudiaron números primos, progresiones y proporciones. A propósito de éstas distinguieron entre media aritmética, media geométrica y media armónica. A esas razones conmensurables, es decir, expresadas por números enteros, añadieron las razones inconmensurables, que, como la razón de la diagonal a un lado de un cuadrado, no podían expresarse mediante números enteros. (Tardaría en conocerse la naturaleza de los números irracionales.) En geometría, junto al teorema de Pitágoras, advirtieron que la suma de los ángulos de un triángulo es igual a dos rectos.

Las razones inconmensurables reflejan, a la postre, una preocupación por lo continuo y lo discreto. Ese fue tema central de la escuela eleática, inaugurada por Xenófanes de Colofón y famosa por las aportaciones de Parménides y Zenón. Propuso éste cuatro famosas paradojas sobre el particular (la de la dicotomía, la de Aquiles y la tortuga, la de la flecha y su blanco, y la del estadio). Una línea, venía a decir, podía dividirse indefinidamente; si la división abocaba en un conjunto de puntos de longitud cero, entonces, aun cuando fueran de número infinito sumarían cero, pero

si resultaba en segmentos mínimos, entonces su suma sería infinita.

La escuela sofista, asentada en Atenas, prestó especial atención a los tres problemas de construcción célebres, cuyo origen se remontaba tiempo atrás y a cuya resolución se aplicarían los geómetras helenistas posteriores: duplicación del cubo (construir un cubo cuyo volumen sea doble que el de otro dado), trisección de un ángulo y cuadratura del círculo. Hippías de Elis, contemporáneo de Sócrates, inventó la cuadratriz en su intento por trisecar el ángulo. Antífono y Brison se ocuparon de la cuadratura del círculo; el primero abordó el área del círculo mediante la inscripción de polígonos de un número creciente de lados, idea que complementó Brison con el empleo de polígonos circunscritos.

Platón, discrepante de la filosofía sofista en muchos aspectos, tuvo por maestros a los pitagóricos Teodoro de Cirene y Arquitas. Si Teodoro ha pasado a la historia por sus trabajos sobre razones inconmensurables, Arquitas se propuso resolver el problema de la duplicación del cubo a través de dos medias proporcionales, construidas a partir de la intersección de un círculo, un cono y un cilindro. Platón y su Academia impulsaron la geometría del espacio. Antes de estudiar la astronomía, que trata de los sólidos en movimiento, postularon que había que explicar los sólidos por sí mismos; conocer, pues, las propiedades del prisma, la pirámide, el cilindro y el cono.

Si Jules Vuillemin admite, en *Mathématiques pythagoriciennes et platoniciennes*, una vinculación necesaria de las matemáticas pitagóricas y platónicas con la filosofía de Platón, a David Fowler le parecen prescindibles esos lazos en *The Mathematics of Plato's Academy*. El profesor francés, recientemente fallecido, busca la explicación profunda del proyecto platónico, es decir, los modelos matemáticos que tejen la urdimbre de su razonar filosófico. Desde un triple enfoque: filológico-histórico, centrado en la revisión crítica de las fuentes; matemático, fundado en la identificación y reconstrucción de los algoritmos, los procedimientos y los principios organizadores de la aritmética pitagórica y platónica; y, por fin, conectivo, en el sentido de articular los modelos suministrados por las dos aproximaciones precedentes en la filosofía de Platón. Arranca Vuillemin de la oposición pitagórica entre lo impar y lo par, que conduce, por reducción al absurdo, a la demostración aritmética de la irracionalidad de $\sqrt{2}$.



1. Platón y Sócrates (Biblioteca Bodleyana, Oxford, MS. Ashm. 304, fol. 31)

El libro de Fowler cuestiona, en su radicalidad, la interpretación vigente sobre la naturaleza y evolución de la matemática griega, con una nueva lectura de los textos platónicos, ceñida a los testimonios que sobreviven del siglo IV y III a.C. Sostiene que la matemática griega no estaba aritmetizada. Y lo demuestra *a sensu contrario*. Examina la matemática aritmetizada y el cálculo con fracciones, para evidenciar que existe una interpretación errónea, persistente, de los cálculos matemáticos griegos. Lo que a menudo se toma por prueba constituye, en realidad, una extrapolación o un arcaísmo.

Aunque las matemáticas griegas hacen amplio uso de los números cardinales, no cabe pensar en la secuencia 1, 2, 3, etc., *qua* cardinales; antes bien, se recoge mejor su sentido con la secuencia mónada, dúo, trío, cuarteto, quinteto, etc. Importa, asimismo, distinguir entre razón (*logos*) y proporción (*analogon*). Aunque tomadas a menudo por sinónimas, designan diferentes clases de entidades matemáticas. Una razón es algo, una función en términos modernos; una proporción es una condición que puede o no mantenerse entre cuatro objetos. Por eso, y aquí coincide Vuillemin con él, otorga un papel central a la noción de "antifairesis", o de "sustracción recíproca" entre dos entidades. Justamente el libro constituye una exploración continuada de las propiedades de la razón antifairética.

En relación con las teorías eleáticas de lo continuo y lo discreto debatióse en la Academia la existencia de "líneas indivisibles". La sostuvo Jenócrates, sucesor de Espeusipo al frente de la escuela platónica y contemporáneo de Aristóteles, quien defendió la postura opuesta para proponer que la línea no equivalía a una sucesión de puntos, ni eran éstos los componentes menores de la recta (*Aristóteles: Sobre las líneas indivisibles–Mecánica. Euclides: Optica–Catóptrica–Fenómenos*). Dentro del corpus aristotélico, *Sobre las líneas indivisibles* y *Mecánica* se consideran obras menores. Es más, la segunda no puede atribuirse al estagirita. Compuestas en el siglo III a.C., quizá por Estratón de Lampsaco, las *Cuestiones mecánicas* pasan revista a diversos fenó-





2. *Primera proyección* (a) *y segunda proyección* (b) *del mapa del mundo según Ptolomeo. A la derecha (c), mapa regional de Africa*

menos, naturales y artificiales, cuyo origen descansa en las propiedades del círculo.

Coetáneo de Estratón fue Euclides, de cuyos *Elementos de geometría* vivió la matemática hasta el siglo XIX. Constan de 13 "libros": seis consagrados a la geometría del plano, cuatro a la teoría de números (incluida la prueba de que el número de los primos es infinito) y tres a la geometría del sólido (tetraedro, octaedro, cubo, icosaedro y dodecaedro, los cinco sólidos platónicos). Conoceremos mejor su *Optica* y la *Catóptrica* pseudoeuclídea si sumamos a las introducciones españolas el trabajo de Alexander Jones en *Ancient and Medieval Traditions in the Exact Sciences,* una gavilla de ensayos dedicada a Wilbur Knorr, donde se profundiza también en la figura de Eudoxo (fuente de las ideas de proporcionalidad que subyacen bajo el libro V de los *Elementos* de Euclides), en la química geométrica de Platón o en la teoría del análisis.

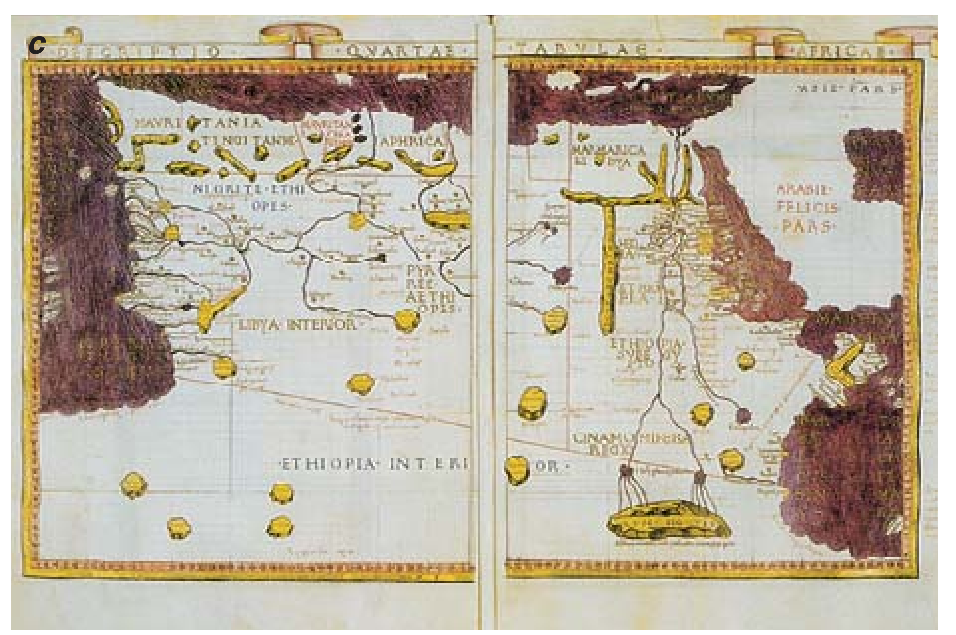
Se propone en la *Optica* desarrollar una teoría matemática de la visión opuesta a las teorías físico-filosóficas de atomistas y epicúreos, que estaban en boga en torno al 300 a.C. Según Euclides, desde un punto del ojo emana un cono de luz que se proyecta sobre los objetos. Habría unas líneas de visión discretas y separadas por intervalos, responsables de las limitaciones de la percepción. Demuestra que las partes más alejadas de un plano que caen por debajo del nivel del ojo son vistas "más altas", que las líneas paralelas aparecen más abiertas cuando se encuentran cerca del ojo y que la parte de la esfera percibida por el ojo es menor que un hemisferio. Prueba, asimismo, que, cuando los objetos se mueven paralelos entre sí a velocidades iguales, los más alejados de nuestra vista parecen ir más rápidos.

En la *Catóptrica* se detallan y desatan las dificultades que presenta la reflexión de la luz. Basábase la disciplina en tres postulados: el punto-imagen aparece siguiendo el rayo visual incidente, el punto-imagen está situado en la perpendicular trazada del punto-objeto al espejo y el rayo visual incidente y el rayo visual reflejado forman ángulos iguales con la perpendicular al espejo trazada por el punto de reflexión.

Sobre catóptrica escribió en el siglo primero de nuestra era Herón de Alejandría, quien distinguía entre una matemática "más honorable y primera", formada por la aritmética y la geometría, y otra "que se ocupa de lo sensible" y que consta de seis partes: la logística, la geodesia, la canónica, la óptica, la mecánica y la astronomía. No fue éste sólo un geómetra teórico, sino que realizó también aplicaciones técnicas de trascendencia histórica. Consagró una extensa monografía a la construcción y el empleo de un instrumento topográfico para medir ángulos en distintos planos, *La dioptra* (*Autour de* La Dioptre *d'Héron d'Alexandrie*). Permitía esa suerte de teodolito determinar distancias y alturas inaccesibles, construir y mantener acueductos, así como practicar una precisa agrimensura.

Se trataba de un instrumento intercambiable, con una parte fija, el pie, sobre el que descansaba una espiga cilíndrica, a cuyo alrededor encontrábamos, por un lado, un disco de bronce y, por otro, un tubo del mismo material, que aseguraba la movilidad de las piezas que se le agregaban. Eran éstas una rueda dentada y un plinto; un tornillo sin fin hilvanaba un hilo en la rueda dentada. Dotado de un nivel de agua, permitía operaciones de nivelación y, aunque carecía de luneta, con la observación ocular a través de las ranuras podían acometerse mediciones de ángulos. En su fundamentación teórica, Herón hace amplio uso de la semejanza de triángulos. Con la alineación, se apoya en la perpendicularidad para localizar cualquier punto por sus





coordenadas ortogonales y trazar los polígonos susceptibles de facilitar el levantamiento del plano y el cálculo de las áreas.

En *La Dioptra* encontramos su famosa fórmula sobre el área del triángulo, según la cual las longitudes de los lados del mismo determinan su área. La hallamos expresada en términos modernos en *Trigonometry,* por I. M. Gelfand y M. Saul, como sigue:

$$S = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)},$$

donde a, b y c son las longitudes y $s = (a+b+c)/2$. Obviamente, este manual escolar no restringe su valor a la ecuación indicada, sino que nos ayudará mucho a entender la geometría euclídea subyacente en el período de la reseña. Y, en particular, la geografía de Ptolomeo (*Ptolemy's Geography. Annotated Translation of the Theoretical Chapters*).

Escrita en el siglo segundo de la era cristiana la *Geografía* de Ptolomeo constituyó a lo largo de más de 1500 años la topografía más detallada de Europa, Africa y Asia y la mejor referencia sobre cómo recoger datos y dibujar mapas. Ptolomeo recurrió a la observación astronómica y a la matemática para determinar los lugares. Introdujo las coordenadas de longitud y latitud, de suerte que cualquiera que poseyera sólo el texto del compendio pudiera reproducir el mapa en cualquier tiempo, en todo o en parte, a cualquier escala. E ideó proyecciones cartográficas para ofrecer una impresión visual de la curvatura de la Tierra, mientras conservaba en lo posible las distancias relativas entre plazas.

Parte del modelo de dos esferas del cosmos; una enorme, que desarrolla un giro diario en torno a un eje que pasa por su centro, centro ocupado por la segunda, la terrestre. Las intersecciones entre el eje de rotación y la esfera de las estrellas fijas, la externa, definen el polo celeste norte y polo celeste sur. Con respecto a estas direcciones, la rotación diaria de los cielos procede de este a oeste. En virtud de esta rotación diaria, las estrellas fijas recorren círculos paralelos, todos ellos centrados en los polos; el mayor de los círculos paralelos es el ecuador, que se define por el plano que atraviesa el centro del cosmos y es perpendicular al eje.

Puesto que la Tierra es una esfera, cada lugar de su superficie admite un plano tangente, llamado plano del horizonte. Aunque constituye otro gran círculo del cosmos, el horizonte no gira. (En el cuadro ptolemaico la Tierra permanece inmóvil.) Para una determinada localidad, el horizonte tiende un ángulo fijo de inclinación con el eje de rotación de la esfera celeste.

El ángulo de inclinación, o *latitud* del lugar, varía con la situación del observador. Ptolomeo supone que el lector se encuentra en una latitud intermedia del hemisferio septentrional. Para un tal sujeto, las estrellas se dividen en tres grupos: estrellas que se hallan por encima del horizonte (permanentemente visibles), estrellas con orto y ocaso (unas veces visibles y otras no) y estrellas sin orto (siempre invisibles). Separando esos tres grupos de estrellas se encuentran dos círculos paralelos de igual tamaño. Uno, al norte del observador, media entre las estrellas que nunca se ponen y las estrellas con orto y ocaso; se le denomina *el mayor de los círculos siempre visibles*. El otro, al sur, se intercala entre las estrellas que nunca salen y las estrellas con orto y ocaso; forma *el mayor de los círculos siempre invisibles*. Los dos puntos donde estos círculos coinciden con el horizonte señalan el norte y el sur; las intersecciones del ecuador con el horizonte indican los puntos del este y el oeste.

Viajando al este o al oeste, se define un *paralelo* de latitud, es decir, un círculo de la esfera terrestre paralelo al ecuador. Si imaginamos un plano que contenga el eje norte-sur y atraviese una localidad de la superficie terrestre, este plano cortará la esfera terrestre en un círculo mayor, el *meridiano*.

Ptolomeo recurre al grado como unidad para medir arcos a lo largo de círculos meridianos y paralelos

Ciencia y género

L'INVENTION DU NATUREL. LES SCIENCES ET LA FABRICATION DU FÉMININ ET DU MASCULIN. Dirigido por Delphine Gardey e Ilana Löwy. Editions des Archives Contemporaines; París, 2000.

Esta monografía constituye un nuevo título de la colección "Historia de las ciencias, las técnicas y la medicina" que desde hace una década dirige John Krige. Recoge las comunicaciones que se presentaron a las dos jornadas organizadas por Gardey y Löwy bajo el título "Género y ciencia. Estado de la cuestión histórica en Francia y el extranjero" y "La invención de lo natural: el papel de las ciencias en la conceptualización y legitimación de lo masculino y femenino". Su contenido se ha articulado en tres partes que incluyen once trabajos de investigadores franceses, holandeses, británicos y estadounidenses bajo los siguientes epígrafes: "Estudios feministas, de género y cuestiones de aquí y de allá", "Las ciencias humanas ante el sexo, la naturaleza y lo femenino" y "Lo biológico, lo social y el género".

Esta obra aborda desde puntos de vista muy diversos un problema que es objeto de numerosas investigaciones desde hace varias décadas, los saberes científicos y su relación con la construcción de lo masculino y lo femenino. La aparición del concepto de "género" en los años setenta en el mundo anglosajón es el punto de partida del trabajo de N. Oudshoorn y presenta la toma de postura que feministas como ella adoptaron ante la distinción entre sexo biológico y social que ello supuso. E. F. Keller plantea el debate existente sobre si la utilización de la metáfora de género en la actividad científica introdujo valores culturales y hasta qué punto el lenguaje interviene en la ciencia. M. Perrot y J. Peiffer son autoras de dos estudios historiográficos centrados en la investigación sobre mujeres y ciencia en Francia.

La segunda parte comienza con una contribución de E. Varikas acerca de la utilización de lo "natural femenino" para "naturalizar" la condición subordinada de la mujer en los siglos XVII y XVIII, en el marco de una teoría política clásica de la dominación. Desde un enfoque antropológico, N. C. Mathieu aborda la concepción que de la naturaleza y la mujer rige en el pensamiento occidental, máximo productor de la ciencia actual, mientras que A. M. Devreux analiza desde la sociología la naturalización de los géneros. I. Löwy cierra este apartado con unas reflexiones sobre la contribución de los estudios de género al análisis del concepto de ciencia universal.

La última parte incluye tres estudios que debaten las relaciones sociales y de género emanadas de problemas biológicos como la homosexualidad (B. Lhomond), las enfermedades mentales (J. C. Coffin) y la determinación del sexo (C. Kraus). Una extensa bibliografía cierra esta edición en la que el lector encuentra un abanico plural de enfoques sobre la elaboración de lo masculino y lo femenino por los científicos y, aunque ya conocidos en buena parte por anteriores trabajos de los autores, acierta en el objetivo planteado por las directoras en la introducción del libro, presentar un espacio de discusión en el que converjan algunas de las múltiples líneas de investigación que sobre la relación entre género y ciencia se llevan a cabo en la actualidad.

—MARÍA JOSÉ BÁGUENA CERVELLERA

de latitud. Estableció un sistema uniforme de coordenadas en grados para especificar las posiciones sobre la superficie terrestre. Mide la latitud norte o sur a partir del ecuador a lo largo de un círculo meridiano, y la longitud a lo largo del ecuador entre ese meridiano y el meridiano que pasa por el lugar más occidental de su mapa.

Las distancias lineales medidas de un lugar a otro se expresaban en estadios. (Un estadio equivalía a unos 185 metros.) Los estadios podían convertirse en grados de acuerdo con el supuesto según el cual 500 estadios equivalían a un grado medido a lo largo del ecuador o a lo largo de un meridiano.

Una vez el cartógrafo ha construido una parrilla apropiada, del mapa del mundo o una de sus regiones, debe levantar el mapa aprovechando la lista de coordenadas ofrecida en *Geografía*.

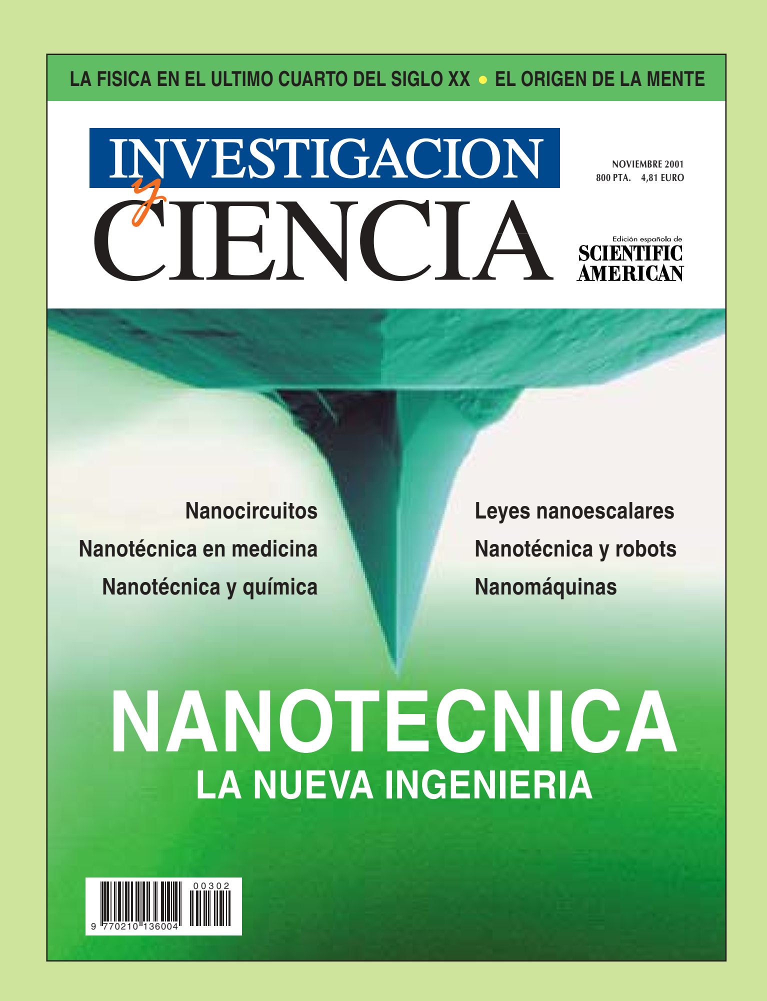
Los problemas de la geometría griega se clasificaban en problemas planos, resolubles con las herramientas de Euclides (regla y compás), problemas sólidos, que requieren secciones cónicas, y problemas lineales, mediante otras curvas. En tiempos de Pappus (*Pappus of Alexandria and the Mathematics of Late Antiquity*) se consideraba preferible una solución del plano a otra que exigiera secciones cónicas, y ésta, mejor que la que prescribiera el empleo de una curva especial (espiral, cuadratriz y cocloide).

Pappus reelabora a Euclides y a Herón en su *Colección matemática*. A ellos, a Aristeo, Apolonio y a bastantes más de los que le precedieron. Y no sólo reelabora. Propone el método de análisis para el estudio de la geometría avanzada. Entiende por análisis teórico el que busca establecer que algo es verdadero, el teorema de Pitágoras por ejemplo; propio del análisis problemático es idear construcciones de objetos geométricos, sean euclidianos o las secciones cónicas.

En el libro quinto de la *Colección* aborda la isoperimetría, es decir, la relación entre el perímetro, la superficie y el volumen de una figura geométrica, cuestión tradicionalmente vinculada a la de los cinco cuerpos platónicos, poliedros cuyas caras son polígonos regulares iguales. Y establece que, entre figuras del plano con el mismo perímetro, el círculo tiene el área mayor; entre las figuras sólidas con la misma área, la esfera tiene el volumen mayor. Además, infiere, dados dos polígonos regulares cualesquiera del plano con el mismo perímetro, el que presenta el mayor número de ángulos tiene el área mayor y, en consecuencia, dado un polígono regular del plano y un círculo con el mismo perímetro, el círculo tendrá un área mayor.

—LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



INFORME ESPECIAL: NANOTECNICA

NANOTECNICA, LA NUEVA INGENIERIA, por Gary Stix
La nanotécnica ha entrado con fuerza en las instituciones académicas. En ella se han puesto ambiciosas esperanzas.

NANOTECNICA Y SUS PROCESOS DE FABRICACION, por George M. Whitesides y J. Christopher Love
Los investigadores descubren procesos económicos y eficaces para construir estructuras de sólo nanómetros de anchura.

LEYES NANOESCALARES, por Michael Roukes
Hay sitio para innovaciones prácticas nanoescalares. Pero antes será necesario comprender las peculiares leyes físicas que rigen la materia a escala nanométrica.

NANOCIRCUITOS, por Charles M. Lieber
Se han construido ya nanotransistores y filamentos nanométricos. Falta encontrar ahora la manera de ensamblarlos.

NANOTECNICA EN MEDICINA, por A. Paul Alivisatos
Refinadas formas de técnica se usarán por primera vez en el mundo real en la investigación biomédica, el diagnóstico de enfermedades y en su curación.

NANOTECNICA Y ROBOTS, por K. Eric Drexler
Uno de los iniciadores de la nanotécnica molecular predice que diminutísimos robots revolucionarán la industria fabril y transformarán la sociedad.

NANOTECNICA Y QUIMICA, por Richard E. Smalley
¿Cuánto tardaremos en ver los robots de escala nanométrica imaginados por Eric K. Drexler y otros nanotecnólogos moleculares? La respuesta es simplemente nunca.

PRESENTE Y FUTURO DE LAS NANOMAQUINAS, por George M. Whitesides
Los biólogos comienzan a adentrarse en las posibilidades simuladoras que ofrecen los metabolitos, los orgánulos y las propias células.

LA FISICA EN EL ULTIMO CUARTO DEL SIGLO XX, por Xavier Roqué
¿Qué es lo más significativo que le ha sucedido a la física en los últimos 25 años? ¿Cuáles son las tendencias en la disciplina y los retos de futuro? ¿Cómo se ve este panorama desde nuestro país? El autor propone algunas respuestas sucintas a estas cuestiones.

EL ORIGEN DE LA MENTE, por Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez Mendizábal
Desde Darwin los evolucionistas vienen discutiendo sobre el origen de la consciencia y el lenguaje. Los huesos hioides desenterrados en el yacimiento de Atapuerca constituyen una pieza fundamental para explicar la adquisición del habla.

